

Technische Universität Dresden

**Kontakt- und Langzeitverhalten von stromführenden  
Schraubenverbindungen mit vernickelten und  
versilberten Leitern aus Aluminiumwerkstoffen**

**Torsten Fuhrmann**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität  
Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. Thomas Härtling

Tag der Einreichung: 04.02.2019

Tag der Verteidigung: 29.05.2019



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) der Technischen Universität Dresden. Die Forschungsinhalte zu metallischen Überzügen wurden im Rahmen der Kooperation mit der ABB Schweiz AG und zum Kraftabbau an Verbindungen mit Aluminiumleitern zu einem großen Teil im Verbundprojekt: „Langzeitstabile Aluminiumlegierungen für elektrische Verbindungen“ (ALLEE) erarbeitet.

Der ABB Schweiz AG und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) danke ich vielmals für die finanzielle Förderung der Projekte.

Bei allen Kollegen und Kolleginnen des IEEH bedanke ich mich für die sehr gute Zusammenarbeit, ihre Hilfs- und Diskussionsbereitschaft, sowie das gute und freundliche Miteinander auch nach der Arbeitszeit. Ich danke Prof. Dr.-Ing Steffen Großmann, meinem betreuenden Hochschullehrer von der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, für die sehr guten Arbeitsbedingungen, seine offene und herzliche Persönlichkeit, sowie der Übernahme des Erstgutachtens. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, Lehrstuhl für Werkstofftechnik (LWT) der Universität Rostock, für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie für die hilfreichen fachlichen Beiträge im Forschungsbereich der Werkstofftechnik und der sehr guten Leitung im Projekt „ALLEE“. Markus Hoidis und seine Kollegen von der ABB Schweiz AG haben durch ihre vielfältige fachliche Unterstützung, das persönliche Engagement und die inhaltlich wertvollen Projektbesprechungen wesentlich zum Verständnis und somit dem Inhalt der Arbeit beigetragen.

Herr R. Andrußies, FUJIFILM Europe GmbH, hat bei der Auswertung der Messungen mit Druckmessfolien wertvolle Unterstützung geleistet, wofür ich ihm herzlich danke. Bei Frau Dr.-Ing. Veneta Schubert, Frau Dr.-Ing. Birgit Vetter und insbesondere bei Petra Lutze vom Institut für Werkstoffwissenschaft (IfWW) möchte ich mich für die qualitativ sehr guten metallographischen Untersuchungen bedanken, die wesentlich zur Interpretation des Werkstoffverhaltens geführt haben. Ebenso danke ich Dr. Johannes Aegerter und Dr. Martin Christoph Lentz, Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, sowie Richard Kemsies (LWT) für die metallographischen Untersuchungsergebnisse, sowie deren Interpretation und Diskussion. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel als meinem ehemaligen Gruppenleiter und Bürokollegen für das stetige Bemühen zum Finanzieren des Personals, sowie der fachlichen Unterstützung bei der Ausrichtung der Arbeit und der Diskussionsbereitschaft der Inhalte. Meinen ehemaligen Studien- und Diplomarbeitern: André Spiegel, Tobias Gabler, Axel Friedrich und Toni Israel danke ich vielmals und sehr herzlich für ihre wertvollen Beiträge und ihren persönlichen Einsatz.

Mein persönlicher Dank gilt meiner gesamten Familie, die mir auf meinem Weg jederzeit den Rücken gestärkt und mich insbesondere in der finalen Phase motiviert und in schwierigen Zeiten zugehört hat. Vorallem meiner Frau Frances Fuhrmann verdanke ich die Vollendung meiner Arbeit, weil Sie sich so aufopferungsvoll um unsere liebe Tochter Allegra Frances Fuhrmann gekümmert hat um mir die Zeit zum Schreiben zu ermöglichen.

## Kurzfassung

Schraubenverbindungen sind eine technische Lösung um Stromschienen aus Aluminium mechanisch und elektrisch zu verbinden. Als stationäre Verbindungen sollen sie für eine Zeit von 30 Jahren und mehr den Betriebsstrom übertragen ohne dabei die genormten, zulässigen Grenztemperaturen zu überschreiten. Die Grundvoraussetzung für eine langzeitstabile, stromführende Verbindung ist ein geringer Anfangswert des Verbindungswiderstands nach der Montage. Dieser ist abhängig von der Kontaktkraft und kann für jede Kombination aus Fügeelementen, Werkstoffen und Topografie der Leiteroberflächen an der konstruierten Verbindung experimentell bestimmt werden. Allgemeingültige Modellrechnungen zum elektrischen Kontaktverhalten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen waren bisher nicht möglich.

In dieser Arbeit wurde durch numerische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen eine Korrelation zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Kontaktverhalten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen hergestellt. Es wurde die inhomogene mechanische Spannungsverteilung auf der Kontaktfläche zwischen den Stromschienen bestimmt und damit ein Modell zum Berechnen des elektrischen Kontakt- und Verbindungswiderstands mit der Berücksichtigung des tatsächlich stromdurchflossenen Leitermaterials aufgestellt.

Der Verbindungswiderstand kann sich, abhängig von der Temperatur und Zeit, durch verschiedene Alterungsmechanismen erhöhen. Das Altern durch den Abbau der Kontaktkraft wurde an Schraubenverbindungen mit unbeschichteten Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen untersucht. Es wurde die Kontaktkraft und der Verbindungswiderstand über einen Zeitraum von bis zu vier Jahren bei Temperaturen zwischen (80 ... 160) °C bestimmt. Diese Untersuchungen wurden für ein System mit und ein System ohne federnde Fügeelemente durchgeführt, sowie die Kontaktkraft für eine Betriebszeit von 30 Jahren berechnet. Im Vergleich mit der experimentell bestimmten Mindestkontaktkraft und dem Werkstoffverhalten wurde eine Prognose zur Langzeitstabilität der stromführenden Verbindungen für eine konstante Belastung im Betrieb gegeben. Weiterhin wurden mit dem zeit- und temperaturabhängigen Verhalten der Aluminiumwerkstoffe zulässige Grenztemperaturen ermittelt, bei denen keine Entfestigung während der Betriebszeit auftritt.

Für Schraubenverbindungen mit vernickelten und versilberten Stromschienen wird eine identische, dauerhaft zulässige Grenztemperatur von 115 °C in der Norm angegeben [N1]. Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der metallischen Überzüge, sowie die Reaktivität mit der Umgebung sind aber sehr unterschiedlich. An stromführenden und stromlos im Wärmeschränk bei 115 °C und 140 °C gelagerten Verbindungen wurde der Verbindungswiderstand bis zu einer Zeit nach  $t = 25.000$  h bestimmt. Es wurde das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit zwei beschichteten Stromschienen, sowie einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium untersucht und bewertet. Abhängig vom Schichtaufbau des metallischen Überzugs mit verschiedenen Zwischenschichten und Schichtdicken wurde der Einfluss der Interdiffusion mit der Bildung intermetallischer Phasen (IMP) auf das Langzeitverhalten der Verbindungen untersucht.

## Abstract

A bolted joint is one technical possibility for mechanically and electrically connecting two busbars made of aluminium. This stationary connection shall carry the operating current for more than 30 years without exceeding the permissible limiting temperature given by international standards. For long-term stable, current-carrying connections a good electrical contact behaviour with a low initial value of the joint resistance is required after bolting. The joint resistance depends on contact force and can be measured at the constructed electrical joint for each combination of joining elements, conductor materials and pretreatment of conductor surfaces. General calculations for the electrical contact behaviour of current-carrying joints with flat contact surfaces, such as bolted joints with busbars, were not possible until now.

In this thesis numerical calculations and experimental investigations were used to establish the relationship between mechanical and electrical contact behaviour of a bolted joint with busbars. In the first step, the inhomogeneous distribution of the mechanical stress was calculated on the contact area between two busbars. In the second step, a calculation model for the joint resistance and the contact resistance was created and verified by experiments.

The joint resistance can increase by different ageing mechanisms depending on operating temperature and time. Ageing by the reduction of contact force was investigated on bolted joints with uncoated busbars made of various aluminium alloys. In long-term tests, these joints were loaded with temperatures between 80 °C and 160 °C. The contact forces and joint resistances were determined for up to four years of operation. Bolted joints with spring elements and without spring elements were investigated. Based on the results of these long-term tests, the contact force was calculated for up to 30 years of operation and compared with the experimentally determined minimum contact force of the joint. Together with the temperature and time dependent behaviour of the conductor materials, the long-term stability of the joints was evaluated for the case of constant thermal load during operation. Furthermore, permissible limiting temperatures at which no softening occurs during operation could be determined for various aluminium alloys.

An identical limiting temperature of 115 °C is permanently permitted for bolted joints with nickel-coated and silver-coated busbars [N1] but the mechanical and electrical properties of the materials for these metallic coatings are very different. The chemical reactivity of both coatings also differs according to the environment. In long-term tests at current-carrying joints and joints which were aged in ovens at temperatures of (115 and 140) °C, the joint resistances were determined up to an operating time of  $t = 25.000$  hours. Bolted joints with two identical coated busbars and also bolted joints with one coated and one bare busbar made of aluminium were investigated and evaluated. The influence of metallic coatings with different intermediate layers and layer thicknesses on the contact and long-term behaviour of the joints were examined. Due to interdiffusion between different materials, intermetallic compounds (IMC) can be formed. The ageing of bolted joints with coated busbars caused by the formation of IMC with poor electrical and mechanical properties compared to pure metals was investigated.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Werkstoffe für elektrische Leiter und metallische Überzüge .....	2
2.1	Aluminiumwerkstoffe für die Elektrotechnik .....	2
2.1.1	Einfluss der Mikrostruktur .....	4
2.1.2	Herstellen, Umformen und Nachbehandeln .....	6
2.1.3	Ausscheidungshärten von Al-Mg-Si-Legierungen .....	7
2.2	Metallische Überzüge aus Silber und Nickel .....	8
2.2.1	Elektrolytisches Beschichten .....	11
2.2.2	Autokatalytisches Beschichten .....	12
3	Grundlagen zu stromdurchflossenen Flächenkontakten.....	13
3.1	Kontaktverhalten in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen.....	15
3.2	Gütefaktor zum Beurteilen der Qualität der stromführenden Verbindung.....	18
4	Alterung stromführender Verbindungen .....	19
4.1	Chemische Reaktionen .....	20
4.2	Kraftabbau in einer Schraubenverbindung .....	22
4.2.1	Elastische und plastische Verformung .....	24
4.2.2	Zeit- und temperaturabhängige Werkstoffentfestigung .....	25
4.2.3	Viskoplastische Verformung abhängig von der Temperatur.....	27
4.2.4	Berechnen der Kontaktkraft .....	31
4.3	Interdiffusion zwischen unterschiedlichen metallischen Werkstoffen .....	32
4.3.1	Metallische Überzüge aus Silber .....	36
4.3.2	Metallische Überzüge aus Nickel als Zwischen- und Deckschicht .....	36
5	Aufgabenstellung .....	39
6	Untersuchungen zu beschichteten und unbeschichteten elektrischen Flächenkontakten .....	40
6.1	Experimentell ermittelte Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe.....	40
6.2	Geometrie der untersuchten Stromschienen und Fügeelemente der Schraubenverbindungen .....	42
6.2.1	Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF).....	43
6.2.2	Schraubenverbindung mit federnden Fügeelementen (MFF) [79] .....	44
6.3	Vorbehandlung, Montage und Inbetriebnahme der Langzeitversuche.....	45
6.4	Erzeugen und Messen der Kontaktkraft im Langzeitversuch .....	48
7	Elektrisches Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit unbeschichteten Stromschienen .....	50
7.1	Untersuchungen zum Kontaktverhalten.....	50

---

7.1.1 Mechanisches Berechnungsmodell .....	52
7.1.2 Elektrisches Berechnungsmodell .....	63
7.2 Untersuchungen zum Langzeitverhalten .....	75
7.2.1 Zeit- und temperaturabhängige Härte des Aluminiums .....	76
7.2.2 Zeit- und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums .....	78
7.2.3 Versuchsergebnisse zum Langzeitverhalten.....	80
7.2.4 Abschätzen der Restkontaktkraft .....	84
7.2.5 Zusammenhang zwischen der Kraft und dem Widerstand der Verbindung .....	87
7.3 Zusammenfassung .....	90
8 Elektrisches Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit vernickelten und versilberten Stromschienen .....	93
8.1 Untersuchungen zum Kontaktverhalten.....	95
8.2 Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen .....	98
8.2.1 Zeit- und temperaturabhängige Härte der metallischen Überzugwerkstoffe .....	100
8.2.2 Zeit- und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit des Ni-P (Typ 5).....	102
8.3 Kraftabbau an Schraubenverbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen .....	104
8.4 Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene .....	105
8.5 Mikroskopische Untersuchungen .....	108
8.6 Weitere Untersuchungen zur Alterung von Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen .....	113
8.6.1 Einfluss des Phosphorgehaltes in metallischen Überzügen aus Ni-P.....	114
8.6.2 Einfluss der Art der thermischen Alterungsprüfung – Dauerlast / Wechsellast ....	116
8.7 Zusammenfassung .....	119
9 Ausblick .....	121
Literaturverzeichnis .....	123
Abbildungsverzeichnis.....	131
Tabellenverzeichnis.....	138
Anhang.....	140

## Zeichen, Benennungen und Einheiten

### Zeichen:

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha_L$	K <sup>-1</sup>	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\alpha_T$	K <sup>-1</sup>	Temperaturkoeffizient des spez. elektrischen Widerstands
$a$	m	Halbachse einer Ellipsenfläche
$A_B$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche der Durchgangsbohrung
$A_{\text{Elek}}$	m <sup>2</sup>	Makroskopisch betrachtete elektrisch kontaktierte Fläche
$A_{\text{ers}}$	m <sup>2</sup>	Ersatzquerschnittsfläche in einer Schraubenverbindung
$A_{\text{FEM}}$	m <sup>2</sup>	Im numerischen Berechnungsmodell nach der Finiten-Elemente-Methode bestimmte mechanisch belastete Fläche
$A_{\text{Folie}}$	m <sup>2</sup>	Mit Druckmessfolien experimentell bestimmte mechanisch belastete Fläche
$A_i$	m <sup>2</sup>	Isolierende Kontaktfläche
$A_{K,B}$	m <sup>2</sup>	Modellierte Kontaktfläche für eine Verbindung mit zwei Stromschienen, sowie Bohrungen und Fase am Rand
$A_{K,F,(n)}$	m <sup>2</sup>	Modellierte Kontaktfläche Nr. 1 bis (n) abhängig von der mechanischen Spannungsverteilung
$A_{K,oB}$	m <sup>2</sup>	Modellierte Kontaktfläche für eine Verbindung mit zwei Stromschienen ohne Bohrung
$A_{K,(OFF)}$	m <sup>2</sup>	Modellierte Kontaktfläche für eine Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen
$A_{K,(OFF),\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}}$	m <sup>2</sup>	Modellierte Kontaktfläche für eine Schraubenverbindung mit Stromschienen und einer mechanischen Spannung $\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}$
$A_m$	m <sup>2</sup>	Metallische Kontaktfläche
$A_{\text{Mech}}$	m <sup>2</sup>	Makroskopisch betrachtete mechanisch kontaktierte Fläche
$A_{\text{oxi}}$	m <sup>2</sup>	Mikroskopisch bestimmte, nur schwach oxidierte Kontaktfläche
$A_q$	m <sup>2</sup>	Quasimetallische Kontaktfläche
$A_s$	m <sup>2</sup>	Scheinbare Kontaktfläche
$A_{\text{Software}}$	m <sup>2</sup>	Kontaktfläche mit der Software von FUJIFILM bestimmt
$A_t$	m <sup>2</sup>	Mechanisch tragende Kontaktfläche
$A_{\bar{u}}$	m <sup>2</sup>	Überlappungsfläche
$A_w$	m <sup>2</sup>	Wahre elektrisch leitende Kontaktfläche
$b$	m	Halbachse einer Ellipsenfläche
$C$	(N mm <sup>-2</sup> ) <sup>-n</sup> s <sup>-1</sup>	Proportionalitätsfaktor für die Berechnung der sekundären Kriechgeschwindigkeit / -rate
$C'$	1	Materialkonstante (Larson-Miller) $C = 20$ für Metalle
$\Delta l$	m	Längenänderung
$\Delta l_s$	m	Verlängern der Schraube durch elastische Dehnung
$\Delta l_{s,OFF}$	m	Verlängern der Schraube in einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente
$\Delta l_{s,MFF}$	m	Verlängern der Schraube durch elastische Dehnung in einer Schraubenverbindung mit federnden Fügeelementen



$\Delta R_V$	$\Omega$	Differenz zwischen $R_{V,real}$ und $R_{V,ideal}$
$\Delta s$	m	Setzbetrag
$d_A$	m	Außendurchmesser der Unterlegscheibe
$d_B$	m	Durchmesser der Durchgangsbohrung ggf. mit Berücksichtigung der Fase am Rand
$d_i$	m	Innendurchmesser der Unterlegscheibe
$d_{IMP}$	m	Dicke der intermetallischen Phase
$d_K$	m	Außendurchmesser der Schraubenkopfauflage
$d_{US}$	m	Außendurchmesser der mechanisch belasteten Fläche der Unterlegscheibe
$D$	$m^2 s^{-1}$	Diffusionskoeffizient
$D_0$	$m^2 s^{-1}$	Frequenzfaktor
$D_{KG}$	$m^2 s^{-1}$	Diffusionskoeffizient für die Diffusion entlang von Korngrenzen
$D_V$	$m^2 s^{-1}$	Diffusionskoeffizient für die Diffusion im Materialvolumen
$\varepsilon$	1	Dehnung / Stauchung
$\dot{\varepsilon}_{II}$	$s^{-1}$	Sekundäre oder stationäre Kriechrate; Kriechgeschwindigkeit
$\dot{\varepsilon}_{II,min}$	$s^{-1}$	Minimale sekundäre Kriechrate; Kriechgeschwindigkeit
$E$	$N mm^{-2}$	Elastizitätsmodul
$F_a$	N	Von außen auf die Verbindung einwirkende Scherkraft
$F_K$	N	Kontaktkraft
$F_{K0}$	N	Anfangswert der Kontaktkraft unmittelbar nach der Montage
$F_{K,EX}$	N	Mit dem Extrapolationsverfahren abgeschätzte Kontaktkraft nach 30 Jahren konstanter Beanspruchung im Betrieb
$F_{K,min}$	N	Mindestkontaktkraft
$F_{K,max}$	N	Maximale Kontaktkraft
$F_S$	N	Federkraft von Spannscheiben
$F_{Setz}$	N	Anteil der abgebauten Kontaktkraft durch Setzen
$\gamma$	1	Schubverzerrung
$G$	$N mm^{-2}$	Schubmodul
$G_V$	S	Kehrwert von $\Delta R_V$
$G'$	$S m^{-2}$	Flächenbezogener Leitwert – Parameter für die elektrische Kontaktfläche im numerischen Berechnungsmodell
$H_K$	$N mm^{-2}$	Kontakthärte
$I$	A	Eingespeister Strom im Berechnungsmodell
$I_B$	A	Betriebsstrom
$I_{B,(i)}$	A	(i=1 bis n) - Teilstrompfade beim Übertragen des Betriebsstromes
$\kappa$	$S m^{-1}$	Elektrische Leitfähigkeit
$k$	$m^2 s$	Wachstumsparameter von intermetallischen Phasen
$k_u$	1	Gütefaktor

$k_{u0}$	1	Anfangswert des Gütefaktors nach der Montage der stromführenden Verbindung
$k_{u,Grenz}$	1	Grenzwert des Gütefaktors abhängig von der Konstruktion der stromführenden Verbindung
$k_{u,ideal}$	1	Minimaler Gütefaktor berechnet für Verbindungen mit $R_K = 0 \Omega$
$k_{u,min}$	1	Mindestwert des Gütefaktors
$k_{u,real}$	1	Minimaler experimentell bestimmter Gütefaktor für gereinigte und gebürstete Kontaktflächen
$k_{u,(OFF),B}$	-	Berechneter Gütefaktor für eine Schraubenverbindung
$k_{u,(OFF),M}$	-	Durch Messungen bestimmter Gütefaktor
$\lambda$	$W K^{-1} m^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$l_0$	m	Anfangswert der Länge einer Werkstoffprobe
$l_K$	m	Klemmlänge in der Schraubenverbindung
$l_S$	m	Länge der Schraube
$l_{\bar{u}}$	m	Überlappungslänge der Stromschienen im Bereich der Verbindung
$\mu$	1	Reibungskoeffizient
$m$	1	Exponent für den Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und dem Kontaktwiderstand
$M_A$	N m	Anziehdrehmoment
$\nu$	1	Querkontraktionszahl
$n$	1	Anzahl der Trennfugen
$n$	1	Spannungsexponent für Norton-Kriechen
$\varphi_1$	V	Elektrisches Potential
$P^*$	1	Larson-Miller-Parameter
$P_V$	W	Verlustleistung in der Verbindung
$P_{Mat}$	W	Verlustleistung in einem homogen stromdurchflossenen, unbeeinflussten Stromschienenabschnitt mit der Länge $l_{\bar{u}}$
$Q$	$J mol^{-1}$	Aktivierungsenergie
$\rho$	$g cm^{-3}$	Dichte
$\rho_{el}$	$\mu\Omega cm$	Spezifischer elektrischer Widerstand
$\rho_{Al}$	$\Omega m$	Spezifischer elektrischer Widerstand des reinen Aluminiums
$\rho_T$	$\Omega m$	Temperaturabhängiger Anteil des spezifischen elektrischen Widerstands
$\rho_{Def}$	$\Omega m$	Anteil durch Gitterdefekte am spezifischen elektrischen Widerstand
$R_{Al 99,5(A)}$	$\Omega$	Elektrischer Widerstand einer Stromschiene aus Al 99,5(A) mit den Abmessungen (40 x 10 x 40) mm
$R_E$	$\Omega$	Engewiderstand
$R_{E,Eigen}$	$\Omega$	Eigenanteil des Engewiderstandes
$R_{E,la}$	$\Omega$	Interaktionsanteil des Engewiderstandes
$R_F$	$\Omega$	Fremdschichtwiderstand
$R_K$	$\Omega$	Kontaktwiderstand

$R_M$	$\Omega$	Tatsächlich stromdurchflossenes Leitermaterial (Bahnwiderstand)
$R_{M1}$	$\Omega$	Materialwiderstand der Stromschiene 1 im Bereich der Verbindung
$R_{Mat}$	$\Omega$	Materialwiderstand eines homogen stromdurchflossenen, unbeeinflussten Stromschienenabschnitts mit der Länge $l_0$
$R_m$	$N\ mm^{-2}$	Zugfestigkeit
$R_p$	$N\ mm^{-2}$	Fließgrenze im Zugversuch als Streckgrenze bezeichnet
$R_{p0,2}$	$N\ mm^{-2}$	Dehngrenze
$R^2$	%	Bestimmtheitsmaß als einfache Maßzahl zur Formulierung der Anpassungsgüte einer Regression in der Statistik
$R_V$	$\Omega$	Verbindungswiderstand
$R_{V,ideal}$	$\Omega$	Idealer, numerisch berechneter Verbindungswiderstand
$R_{V,real}$	$\Omega$	Realer, gemessener Verbindungswiderstand
$\sigma$	$N\ mm^{-2}$	Mechanische Spannung
$\sigma_{ers}$	$N\ mm^{-2}$	Mittlere mechanische Spannung auf der Ersatzquerschnittsfläche $A_{ers}$ in der Schraubenverbindung
$\sigma_i$	$N\ mm^{-2}$	Innere mechanische Spannung in einem metallischen Werkstoff
$\sigma_N$	$N\ mm^{-2}$	Mechanische Spannung senkrecht auf der betrachteten Fläche
$\sigma_{Oxi}$	$N\ mm^{-2}$	Mittlere mechanische Spannung auf der schwach oxidierten Fläche in einer Verbindung mit Stromschienen aus Kupfer
$\sigma_{Max}$	$N\ mm^{-2}$	Maximale mechanische Spannung
$\sigma_{Mittel}$	$N\ mm^{-2}$	Mittelwert der mechanischen Spannung
$\sigma_{US}$	$N\ mm^{-2}$	Mittlere mechanische Spannung für die Auflagefläche einer Unterlegscheibe der normalen Reihe
$\vartheta_E$	$^{\circ}C$	Entfestigungstemperatur des Werkstoffs
$\vartheta_L$	$^{\circ}C$	Oberflächentemperatur eines homogen stromdurchflossenen, unbeeinflussten Stromschienenabschnitts mit der Länge $l_0$
$\vartheta_S$	$^{\circ}C$	Schmelztemperatur bzw. Erstarrungsbereich bei Aluminiumwerkstoffen
$\vartheta_V$	$^{\circ}C$	Oberflächentemperatur der Verbindung
$\tau$	$N\ mm^{-2}$	Schubspannung
$t$	s	Zeit
$T$	K	Absolute Temperatur
$T_S$	K	Absolute Schmelztemperatur bzw. Erstarrungsbereich bei Aluminiumwerkstoffen
$U_V$	V	Elektrische Spannung an der Verbindung
$w_i$	%	Massenanteil einer betrachteten Mischungskomponente $i$ im Verhältnis zum Gemisch
$x$	mm	Axiale Position auf der Kontaktfläche
$y$	$N\ mm^{-2}$	Mechanische Spannung

Abkürzungen:

Symbol	Bedeutung
AC	Aluminium Cast Alloy – Aluminium-Gusslegierung
AC	Alternating Current - Wechselstrom
AW	Aluminium Wrought Alloy – Aluminium-Knetlegierung
AZ	Anlieferungszustand
DC	Direct Current - Gleichstrom
DL	Dauerlastbetrieb
DS	Deckschicht – oberste Schicht bei mehrschichtigen metallischen Überzügen
FEM	Finite-Elemente-Methode
GDOES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy / Glimmentladungsspektroskopie
H	Wärmebehandlungszustand für kaltverfestigtes Aluminium
HS	Bezeichnung des Druckmessbereichs einer Druckmessfolie – Hoher Druck
HHS	Bezeichnung des Druckmessbereichs einer Druckmessfolie – Superhoher Druck
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy / Atomemissionsspektroskopie
IMP	Intermetallische Phase
LW	Bezeichnung des Druckmessbereichs einer Druckmessfolie – Niederdruck
LLW	Bezeichnung des Druckmessbereichs einer Druckmessfolie – Superniederdruck
MFF	Mit federnden Fügeelementen (Schraubenverbindung mit Spannscheiben)
MS	Bezeichnung des Druckmessbereichs einer Druckmessfolie – Mittlerer Druck
O	Wärmebehandlungszustand für weichgeglühtes Aluminium
OFF	Ohne federnde Fügeelemente (Schraubenverbindung mit flachen Unterlegscheiben)
PVD	Physical Vapor Deposition
S	Stromführende Schraubenverbindungen mit Stromschienen im Langzeitversuch
T	Wärmebehandlungszustand T6, T7 für ausscheidungshärtbares Aluminium
TLZ	Temperaturlastzyklen
ÜMK	Übersättigter Mischkristall
W	Wärmeschränk
ZS	Zwischenschicht – zwischen Deckschicht und dem Leiterwerkstoff oder einer dünnen haftvermittelnden Schicht (Bsp.: Zinkatschicht)
ZTA	Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm

# 1 Einleitung

In Anlagen der Elektroenergietechnik werden schon seit etwa einem Jahrhundert Aluminium und Kupfer erfolgreich als stromführende Leiterwerkstoffe eingesetzt. Über diese Leiter wird die elektrische Energie im Energieversorgungsnetz übertragen und elektrische Betriebsmittel miteinander verbunden. Die hohen weltweiten Vorkommen an Aluminium halten den Weltmarktpreis im Vergleich zum Kupfer nahezu konstant und im Vergleich niedrig. Anlagenhersteller prüfen aus diesem Grund, ob Kupfer in bestehenden oder neuentwickelten Anlagen durch Aluminium zu ersetzen ist. Bezogen auf die Dichte hat Aluminium die höhere elektrische Leitfähigkeit und ist deshalb auch für die Fahrzeugelektrik besonders interessant. Für die Anwendung in der Elektrotechnik sind derzeit nur zwei Aluminiumwerkstoffe standardisiert [N2], die als stranggepresste Stromschienen verschraubt werden. Das Dimensionieren von stationären, stromführenden Verbindungen mit einer Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten setzt ein genaues Verständnis über die Betriebsbedingungen und die physikalischen Grenzen der Werkstoffe, sowie der Konstruktion der Verbindung voraus. Derzeit sind für Leiter und Sammelschienen aus Kupfer in Anlagen der elektrischen Energietechnik bis zu 140 °C dauerhaft zulässig [N3]. Aktiviert durch hohe Temperaturen an stromführenden Verbindungen führen verschiedene Alterungsmechanismen zu höheren Verbindungswiderständen im Betrieb. Der Abbau der Kontaktkraft, chemische Reaktionen der Leiteroberflächen mit der Umgebung, das Wachsen von intermetallischen Phasen (IMP) durch Interdiffusion, sowie die Elektromigration und der Reibverschleiß beeinflussen das Langzeitverhalten. Um die Lebensdauer dieser stromführenden Verbindungen abschätzen zu können und technologische Maßnahmen zum Verringern des Anstiegs des Verbindungswiderstands durchzuführen, werden die Alterungsmechanismen stetig weiter erforscht.

Ein gutes Langzeitverhalten setzt ein gutes elektrisches Kontaktverhalten, mit einem kleinen Anfangswert des Verbindungswiderstandes, nach dem Fügen der stromführenden Leiter voraus. In einer Schraubenverbindung mit Stromschienen erfordert das eine hohe Anzahl großflächiger und homogen auf der Kontaktfläche verteilter Mikrokontakte. Diese einzelnen stromführenden Mikrokontakte sind derzeit nicht mit bildgebenden Verfahren im gefügten Zustand der Verbindung bestimmbar. Für ein besseres Langzeitverhalten und für einen niedrigen Kontaktwiderstand in der stromführenden Verbindung werden die Leiter oft metallisch überzogen. Für Schraubenverbindungen gilt die Grenztemperatur von 115 °C bei metallischen Überzügen mit Nickel und Silber [N1], obwohl die elektrischen und mechanischen Eigenschaften dieser beiden Werkstoffe sehr unterschiedlich sind.

In dieser Arbeit werden das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit unbeschichteten und metallisch überzogenen Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen untersucht. Für diese Werkstoffe und die metallischen Überzüge aus Nickel und Silber werden physikalisch bedingte Grenztemperaturen für den dauerhaften Betrieb ermittelt. Es wird weiterhin eine Methode vorgestellt, mit der das elektrische Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen abhängig von der inhomogenen mechanischen Spannungsverteilung auf der Kontaktfläche berechnet werden kann.

## 2 Werkstoffe für elektrische Leiter und metallische Überzüge

In der Elektroenergie-technik werden Werkstoffe aus Kupfer und Aluminium als elektrische Leiter verwendet. Technisch reines Aluminium hat einen Massenanteil an Al von (99,5 ... 99,79) % [1]. Es wird häufig dort verwendet wo die mechanischen Belastungen hauptsächlich durch Stahl in z. B. Aluminium-Stahl-Freileitungen übernommen werden [2]. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum weichen, technisch reinen Aluminium (Kapitel 2.1) werden für die Konstruktion elektrotechnischer Anlagen Aluminiumlegierungen verwendet [3]. Diese Legierungen haben im Allgemeinen eine höhere mechanische Festigkeit. Aluminiumwerkstoffe für technische Anwendungen werden nach dem Herstellungsverfahren in Knetlegierungen (EN **AW**, **W**rought) und Gusslegierungen (EN **AC**, **C**asting), sowie nach einer möglichen Verfestigung durch Umformen oder Wärmebehandlung unterschieden. Nicht aushärtbare (naturharte) Legierungen und aushärtbare Legierungen werden in Gruppen, abhängig von den verwendeten Hauptlegierungselementen, geordnet [1], [N4].

Um das Kontakt- und Langzeitverhalten von stromführenden Verbindungen mit Leitern aus Aluminiumwerkstoffen in elektrischen Anlagen zu verbessern, werden diese oft metallisch überzogen. Als metallische Überzüge sind Zinn, Nickel und Silber für elektrische Kontakte und stromführende Verbindungen mit Leitern aus Aluminiumlegierungen standardisiert [N1], [N5], [N6]. Für diese Verbindungen gelten höhere, dauerhaft zulässige Grenztemperaturen als für stromführende Verbindungen mit unbeschichteten Leitern (Tabelle 2.6).

### 2.1 Aluminiumwerkstoffe für die Elektrotechnik

Für die Anwendung von Aluminium als Leitermaterial in der Elektrotechnik werden in den Normen nur wenige Werkstoffe genannt (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Aluminiumwerkstoffe für die Anwendung in der Elektrotechnik [N2], [N4]

Bezeichnung nach [N4]		Erzeugnisform		
Numerisch	Chemische Symbole	Draht- und Vordraht	Gezogen	Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile
EN AW-1110	EN AW-Al 99,1	X	–	–
EN AW-1350 + Variante (A)	EN AW-Al 99,5	X	X	<b>X</b>
EN AW-1370	EN AW-Al 99,7	X	–	–
EN AW-6101 + Varianten (A) & (B)	EN AW-Al MgSi	X	X	<b>X</b>
EN AW-6201	EN AW-Al Mg <sub>0,7</sub> Si	X	–	–
EN AW-8030	EN AW-Al FeCu	X	–	–
EN AW-8176	EN AW-Al FeSi	X	–	–

Als stranggepresstes Stangenmaterial sind unter diesen Werkstoffen die Knetlegierungen EN AW-1350A und EN AW-6101B standardisiert [N2]. Die Buchstaben „A“ und „B“ bezeichnen nationale Varianten der Werkstoffe, mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung, nach der zeitlichen Reihenfolge ihrer Registrierung [N7], [1]. Aus den stranggepressten Rechteckstangen (Halbzeug) des naturharten Reinaluminiums EN AW-1350A, mit einem Massenanteil an Al von 99,5 % (Al 99,5(A)) und dem legierten, ausscheidungshärtbaren Aluminium

EN AW-6101B mit den Hauptlegierungsatomen Mg und Si (Al MgSi(B)) werden z. B. Stromschienen gefertigt. Für diese beiden Werkstoffe muss neben den genormten mechanischen Eigenschaften, ein Mindestwert der elektrischen Leitfähigkeit vom Hersteller des Halbzeugs erreicht werden (Tabelle 2.2), [N2], [N4], [N8], [1].

Tabelle 2.2: Physikalische, elektrische und mechanische Eigenschaften von stranggepressten Stangen aus Al 99,5(A) und Al MgSi(B) [N2], [N8], [1], [4]

Werkstoffeigenschaften Zustand nach [N9]	Al 99,5(A)	Al MgSi(B)	
	H14	T6	T7
	Physikalische Eigenschaften nach [1], [4]		
Dichte $\rho$ in g cm <sup>-3</sup>	2,7		
Erstarrungsbereich in K (keine feste absolute Schmelztemperatur $T_s$ )	919 ... 930	858 ... 923	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	210 ... 220	$\geq 210$	$\geq 220$
Thermischer Längenausdehnungs- koeffizient $\alpha_L$ in 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (20 ... 200) °C	23,5	23,4	
Elastizitätsmodul $E$ in N mm <sup>-2</sup>	69.000		
Querkontraktionszahl (Poissonsche Zahl) $\nu$	0,32 ... 0,4		
	Elektrische Eigenschaften nach [N2], [N8]		
Elektrische Leitfähigkeit $\kappa$ in MS m <sup>-1</sup> (20 °C)	$\geq 34,8$	$\geq 30$	$\geq 32$
Temperaturkoeffizient des spez. el. Widerstands $\alpha_T$ in K <sup>-1</sup>	0,004 [5] 0,0039 [N2]	0,0036 [5] 0,004 [N2]	
	Mechanische Eigenschaften nach [N2], [N8]		
Zugfestigkeit $R_m$ in N mm <sup>-2</sup>	$100 \leq R_m \leq 140$	$\geq 215$	$\geq 170$
Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N mm <sup>-2</sup>	$\geq 70$	$\geq 160$	$\geq 120$
Härte in HBW (typischer Wert)	33	70	60

Aufgrund der Forderung nach einer minimalen elektrischen Leitfähigkeit und dem Verweis für die Anwendung in der **Elektrotechnik** wurde das Al 99,5 „E-Al“ und das Al MgSi(B) als „E-AlMgSi0,5“ bezeichnet [N10], [1]. Durch das Hinzulegieren von Fremdatomen und durch Kristallgitterfehler (Tabelle 2.3) ist die elektrische Leitfähigkeit von legiertem, kaltverfestigtem Aluminium geringer als für weichgeglühtes, reines Aluminium (Matthiessensche Regel), (Gl. (1)). Der spezifische elektrische Widerstand des Aluminiumwerkstoffs  $\rho_{AL}$  setzt sich aus einem temperaturabhängigen Anteil durch Wärmeschwingung der Atome  $\rho_T$  und dem Widerstandsanteil durch Gitterdefekte  $\rho_{Def}$  zusammen. [1], [6]

$$\rho_{Al} = \rho_T + \rho_{Def} \quad (1)$$

Dabei wird die elektrische Leitfähigkeit stärker durch gelöste Fremdatome herabgesetzt als durch ausgeschiedene Teilchen [1]. Bei dem ausscheidungsgehärteten Al MgSi(B) ist die elektrische Leitfähigkeit im Wärmebehandlungszustand T7 [N9] (überaltert, stabilisiert) durch das vermehrte Ausscheiden und das Wachstum zu großen Partikeln höher als im Zustand T6 [N9] (maximale, mechanische Festigkeit), (Tabelle 2.2). Die Legierungselemente und das Herstellungsverfahren (Kapitel 2.1.2) haben dabei nicht nur einen Einfluss auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs bei niedrigen Umgebungstemperaturen, sondern auch abhängig von der Zeit bei erhöhten Temperaturen (Kapitel 7.2).

### 2.1.1 Einfluss der Mikrostruktur

Reines Aluminium kristallisiert nach der kubisch flächenzentrierten Struktur (kfz). Stromschienen aus Aluminium bestehen aus vielen kleinen Kristallen (Körnern), die an Korngrenzen aneinander treffen und jeweils Träger von Gitterbaufehlern sind (Tabelle 2.3, Bild 2.1).

Tabelle 2.3: Einteilung der Baufehler eines realen Kristalls nach dessen Geometrie [1], [6], [7], nach [9]

Dimension	Charakter	Beispiele
0-D	Punktförmig	Leerstellen, Zwischengitteratome, Fremdatome
1-D	Linienförmig	Stufen- und Schraubenversetzung
2-D	Flächenhaft	Stapelfehler, Grenzflächen (Oberflächen, Phasengrenzen, Groß- und Kleinwinkelkorngrenzen, Grenzen von Ordnungsbereichen)
3-D	Räumlich	Anhäufung von Punktfehlern, Cluster, Ausscheidungen, Poren, Lunker, Risse

Durch diese Gitterbaufehler werden die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe signifikant beeinflusst. Punktförmige Defekte ermöglichen z. B. das Legieren des Aluminiums durch das Einbringen von Fremdatomen auf regulären- oder Zwischen-gitterplätzen des Aluminiumkristalls (Bild 2.1 d, e)). Stufen- oder Schraubenversetzungen entstehen durch Umformen während des Herstellens von Halbzeugen (Kapitel 2.1.2). Durch diese Gitterstörungen werden plastische Verformungen erst möglich. Dabei werden Teile des Kristallgitters auf Versetzungslinien in den Gleitebenen gegeneinander verschoben. Im kfz-Gitter gleiten Versetzungen auf vier möglichen Ebenen durch die Kristalle hindurch.

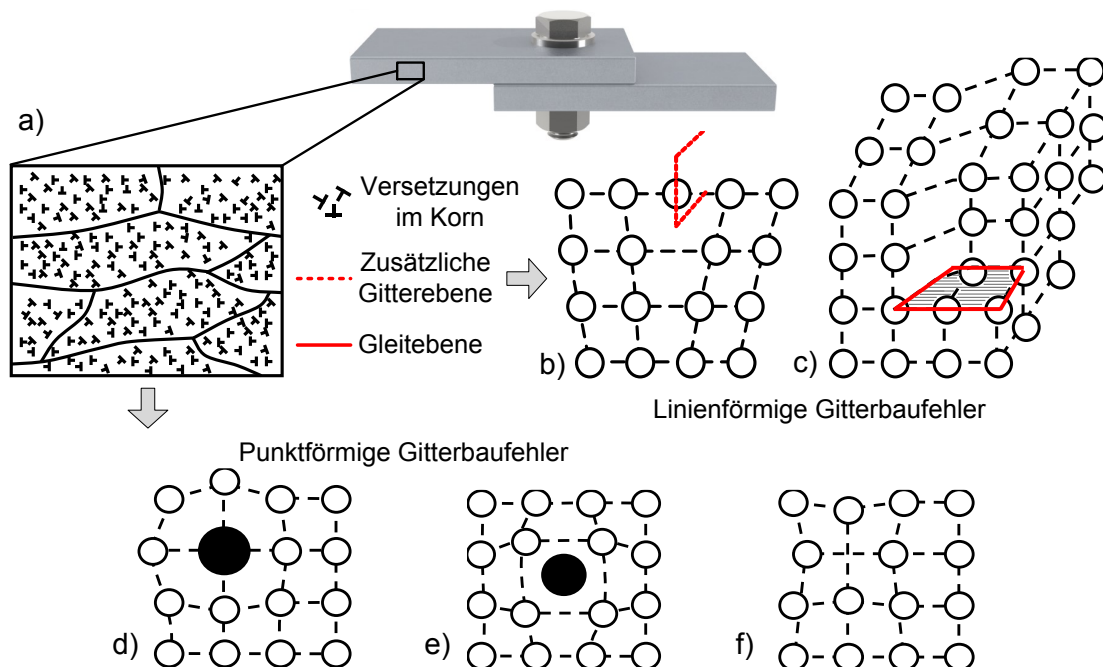


Bild 2.1: Mikrostruktur kaltverfestigter, umgeformter Stromschienen aus Aluminium. a) axial gestreckte Körner mit Gitterbaufehlern, b) Stufenversetzung, c) Schraubenversetzung, d) Fremdatom auf dem Platz eines Aluminiumatoms (Substitutionsatom), e) Zwischengitteratom, f) Leerstelle. (Schematisch) nach [1], [8]



Der Abbau der Kontaktkraft in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen hängt wesentlich von der plastischen Verformbarkeit der Aluminiumwerkstoffe ab. Die plastische Umformung wird durch die Dichte und Neubildung von Versetzungen, deren Beweglichkeit, sowie der Reaktion untereinander und mit anderen Gitterbaufehlern bestimmt. Um das Gleiten von Versetzungen als Hauptmechanismus der plastischen Verformung im Aluminium zu behindern, sind verschiedene Verfestigungsmechanismen bekannt (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Hindernisse für Versetzungen in Aluminiumwerkstoffen [1], [6], [10], [11]

Bezeichnung (Hindernis)		Beschreibung	Prozessschritt (Bild 2.2)
Mischkristallverfestigung (Fremdatome)		Gelöste Fremdatome erzeugen Spannungen im Kristallgitter und Behindern das Gleiten von Gitterteilen in der Gleitebene.	Legieren in der Schmelze
Teilchenverfestigung	Ausscheidungen	Kleine Teilchen oder härtende Phasen. Einbau in den Werkstoff durch Ausscheidungshärten oder als Dispersoid (z. B. Oxid). Partikel behindern Versetzungen auf dem Gleitweg.	Wärmebehandlung nach dem Umformen durch z. B. Strangpressen
	Dispersoide		Wärmebehandlungen nach dem Guss des Aluminiums. Zugabe von Partikeln in ein Metallpulver und anschließendes Sintern.
Kaltverfestigung (Versetzungen)		Versetzungen blockieren sich auf ihrem Gleitweg gegenseitig. Sammeln sich im Werkstoff an. (Versetzungsdichte steigt)	Kaltumformung durch Pressen, Walzen, Tiefziehen bei tiefen Temperaturen
Feinkornhärtung (Korngrenzen)		Ansammeln von Versetzungen in einzelnen Körnern / Kristallen vor der Korngrenze. Zusätzliche Kraft für den Übergang ins Nachbarkorn (Hall-Petch-Beziehung)	a) Hohe Kühlgeschwindigkeit beim Abkühlen der Schmelze. b) Starke Kaltverformung und anschließende Rekristallisation durch Wärmebehandlung.

Gegen das zeitabhängige plastische Verformen von stromführenden Leitern aus Aluminiumwerkstoffen in einer Schraubenverbindung sind insbesondere die maximale mechanische Spannung im Werkstoff und die thermische Stabilität der Hindernisse wichtig. Durch geeignete Verfestigungsmechanismen sollen der Gleitweg der Versetzungen für lange Zeit, bei hohen Temperaturen und mechanischer Belastung blockiert werden. Eine hohe Zeitstandfestigkeit und Kriechbeständigkeit des Leiterwerkstoffs wird durch die Art der Verfestigung und des Herstellungsverfahrens beeinflusst. In der Prozesskette der Herstellung (Kapitel 2.1.2) werden die Eigenschaften direkt durch die Legierungsatome, oder indirekt durch den Umformgrad, die Nachbehandlung und des resultierenden Gefügestandes bestimmt.

Das hier verwendete technisch reine Al 99,5(A) im Zustand H14 ist mischkristallverfestigt, sowie zusätzlich auf die halbe Maximalhärte kaltverfestigt und dadurch gegenüber weichgeglühtem Aluminium gehärtet. Dabei werden die Körner geringfügig in Umformrichtung gestreckt (Bild 2.1 a)). Beim Al MgSi(B) wurde nach dem Umformen durch Strangpressen eine Ausscheidungshärtung (Kapitel 2.1.3) in die Zustände T6 und T7 durchgeführt [N9].

### 2.1.2 Herstellen, Umformen und Nachbehandeln

Für das Herstellen von Stromschienen aus stranggepresstem Stangenmaterial aus Aluminium (Halbzeug) ist ein mehrstufiges Verfahren vom Guss über die Umformung bis zum fertigen Halbzeug notwendig (Bild 2.2).

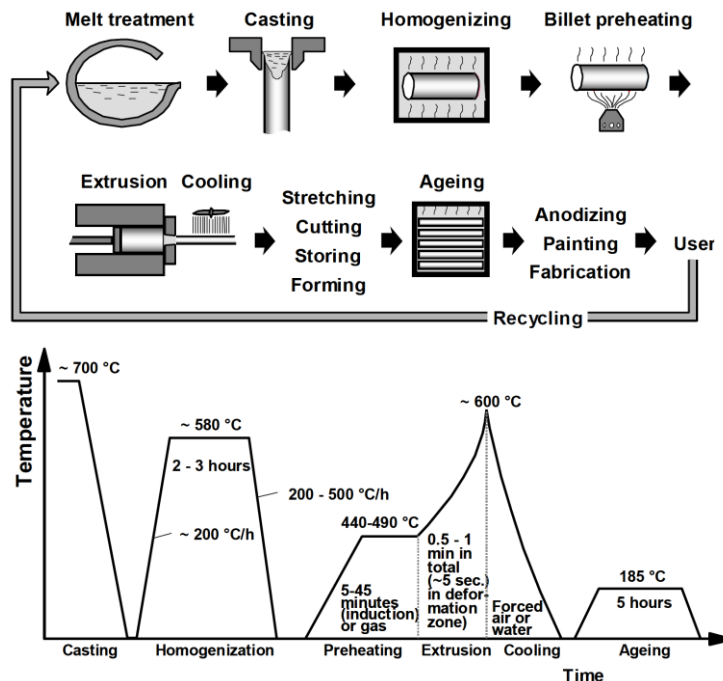


Bild 2.2: Fertigungsverfahren einer Stromschiene vom Guss bis zum Halbzeug [12], [13]

Durch die Auswahl und die Anzahl an hinzulegierten Fremdatomen werden bereits in der Schmelze eine mögliche nachträgliche Aushärtbarkeit, die maximale zu erreichende mechanische Festigkeit und die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs beeinflusst. Für technische Anwendungen wird überwiegend ein Werkstoff mit einem feinkörnigen Gefüge gefordert. Dieser Werkstoff hat im Anlieferungszustand bei Raumtemperatur eine höhere mechanische Festigkeit durch die homogen verteilten, härtenden Teilchen und die hohe Anzahl an Korngrenzen (Tabelle 2.4). Bei hohen Betriebstemperaturen kann die Feinkornhärtung aber zu einer geringen Kriechbeständigkeit führen [11].

#### Herstellen:

Zum Herstellen stranggepresster Stromschienen aus Al 99,5(A) und Al MgSi(B) werden zunächst Strangpressbolzen gegossen. Beim Stranggießen erstarrt die Schmelze in einer wassergekühlten Kokille. Während dieses Abkühlvorganges erstarrt der Bolzen von außen nach innen, sodass am Rand im Vergleich zum langsamer abkühlenden inneren Kern eine andere Mikrostruktur entsteht. Um die Mikrostruktur für das nachfolgende Warmumformen durch Strangpressen vorzubereiten, wird der Stranggussbolzen homogenisierungsgeglüht. Bei diesem Prozessschritt wird durch eine ausreichend lange Erwärmung des Bolzens sichergestellt, dass bereits gelöste und nicht gelöste Bestandteile homogen im Gefüge verteilt sind. Das Glühen wird meist bei Temperaturen dicht unterhalb der Solidustemperatur der jeweiligen Aluminiumlegierung durchgeführt. [1]

Während des Homogenisierungsglühens können Dispersoide (Partikel) im Werkstoff entstehen (Tabelle 2.4). Dispersoide sind härtende Phasen, die sich bei einer höheren Temperatur im Vergleich zu Ausscheidungen (Nachbehandlung) bilden. Dadurch sind sie wahrscheinlich thermisch stabiler bei nachfolgenden Erwärmungsprozessen und führen so zu einer stabileren Verfestigung des Werkstoffs im Vergleich zum Ausscheidungshärten nach dem Umformen. Eine thermisch stabile Verfestigung kann die Zeitstandfestigkeit des Werkstoffs bei thermischer und mechanischer Belastung erhöhen und dadurch wahrscheinlich auch den Abbau der Kontaktkraft in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Aluminium verringern. [13], [14], [15]

#### Umformen:

In der Strangpresse wird der homogenisierte und erwärmte Stranggussbolzen beim direkten Strangpressverfahren mit einem Stempel durch eine formgebende Matrize gepresst [1], [4], [16]. Für Al-Mg-Si-Legierungen wird der Bolzen dafür auf eine Temperatur von (535 ... 550) °C für 4 h bis 12 h erwärmt und während des Umformens bereits lösungsgeglüht (Tabelle 2.5).

#### Nachbehandeln:

Naturharte Legierungen, wie das Al 99,5(A), verfestigen durch Mischkristallbildung. Eine weitere Verfestigung kann nur durch eine Kaltumformung aber nicht durch eine Wärmebehandlung erfolgen. Beim aushärtbaren Al MgSi(B) wird zur Festigkeitssteigerung eine Wärmebehandlung nach dem Umformen und Abschrecken durchgeführt (Kapitel 2.1.3). Dadurch bilden sich Ausscheidungen im Aluminiumgitter, die zu einer höheren mechanischen Festigkeit und abhängig von der Glühdauer und den Temperaturen zu einer bestimmten elektrischen Leitfähigkeit abhängig von der Partikelgröße führen. [1]

### 2.1.3 Ausscheidungshärten von Al-Mg-Si-Legierungen

Beim Ausscheidungshärten von Al MgSi(B) wird die mechanische Festigkeit gezielt durch eine Wärmebehandlung erhöht. Es werden für die Ausscheidungshärtung Legierungselemente im Werkstoff benötigt, die mit abnehmender Temperatur eine abnehmende Löslichkeit im Aluminiummischkristall aufweisen [1]. Das Ausscheidungshärten eines Werkstoffes erfolgt in drei Schritten (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Phasen des Ausscheidungshärtens am Beispiel von Al MgSi(B)

Phasen der Ausscheidungshärtung	Beschreibung
1. Lösungsglügen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erwärmen und Halten des Werkstoffs bei etwa 500 °C</li> <li>- Lösen von Massenanteilen an Mg und Si im Aluminiummischkristall</li> </ul>
2. Abschrecken mit Wasser oder Luft auf Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schnelles Abschrecken des Werkstoffs</li> <li>- Erzeugen eines übersättigten Mischkristalls (ÜMK)</li> <li>- Zustand mit hoher Leerstellenkonzentration</li> </ul>
3. Auslagern bei Raumtemperatur oder Durchführen einer zusätzlichen Wärmebehandlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausscheiden von festigkeitssteigernden Teilchen aus dem Aluminiummischkristall</li> <li>- Verteilung, Größe und Gitter haben einen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften</li> </ul>

Beim Lösungsglühen wird das Al MgSi(B) auf eine Temperatur von etwa (450 bis 550) °C erwärmt [1]. Während der Haltezeit werden Massenanteile an Mg und Si im Aluminiummischkristall gelöst und gleichmäßig im Korninneren verteilt. Außerdem wird beim Lösungsglühen die Leerstellenkonzentration erhöht. Zum Herstellen eines übersättigten Mischkristalls (ÜMK) schließt sich eine schnelle Abkühlung, dem Abschrecken auf etwa Raumtemperatur, an. Der Einfluss Abschreckgeschwindigkeit auf die Eigenschaften des Werkstoffs wurde an Legierungen mit Mg und Si systematisch untersucht und in Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagrammen (ZTA) dargestellt [17]. Das Ausscheiden intermetallischer Teilchen aus dem ÜMK erfolgt diffusionsgesteuert und die Eigenschaften des Werkstoffs werden durch die Größe, Verteilung und Gitterordnung der Teilchen beeinflusst [1], [10]. Diese Teilchen haben nicht nur einen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffs bei Raumtemperatur, sondern beeinflussen auch die Eigenschaften bei hohen Temperaturen. Die Rekristallisation wird durch fein verteilte Ausscheidungen gehemmt (Kapitel 4.2), [1]. Bei der Herstellung von Al MgSi(B) wird der überalterte Zustand T7 [N9], mit einer geringeren Festigkeit gegenüber dem auf das Maximum verfestigten Zustand T6, durch eine längere Erwärmung oder höherer Glüh Temperatur des Werkstoffs eingestellt. Dieser Zustand wird auch als stabilisiert bezeichnet, bei dem metastabile Ausscheidungsphasen mit kohärenten oder teilkohärenten Phasengrenzen in inkohärente, stabile Phasen umgelagert werden. Nur bei einer kohärenten Phasengrenze, also der vollständigen Anpassung des Partikels in das reguläre Kristallgitter, werden Spannungen und damit eine Verfestigung erzeugt. Bei teilkohärenten oder inkohärenten Phasengrenzen entfällt durch die fehlenden Kohärenzspannungen das Behindern des Gleitens von Versetzungen und der Werkstoff entfestigt. [1]

## 2.2 Metallische Überzüge aus Silber und Nickel

Für stromführende Verbindungen mit versilberten und vernickelten Leitern sind im Bereich der Hochspannungs- [N1], [N5], sowie in der Niederspannungstechnik [N6], jeweils dieselben dauerhaft zulässigen Grenztemperaturen standardisiert (Tabelle 2.6).

Tabelle 2.6: Angaben zu zugelassenen Grenztemperaturen für stromführende Leiter und Verbindungen in der Elektroenergie-technik nach internationalen Standards

Zugelassene Grenztemperatur an Betriebsmitteln der Elektroenergie-technik	Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen		Niederspannungs-schaltgeräte	Niederspannungs-Schaltgeräte-kombinationen
	IEC 62271-1 [N1]	IEEE Std. C37.100.1 <sup>TM</sup> [N5]	IEC 60947-1 [N6]	IEC 61439 [N3]
Ort der zugelassenen Grenztemperatur	Verbindung, geschraubt oder gleichwertig verbunden		Anschlüsse / Klemmen	Sammelschienen und Leiter
Leiterwerkstoff	Kupfer, Kupferlegierung		Kupfer / Kupfer-Zink-Legierung	Kupfer
	Aluminiumlegierung		Aluminium nicht berücksichtigt	
Beide Kontakte: unbeschichtet	90 °C	90 °C	(100 / 105) °C	140 °C
Beide Kontakte: Ni oder Ag	115 °C	115 °C	(110 / 110) °C	Keine Angabe
Kontakt (A): Ni oder Ag Kontakt (B): unbeschichtet	115 °C	90 °C	Keine Angabe	Keine Angabe

Die Grenztemperaturen werden abhängig vom umgebenden Medium (Luft, Öl, SF<sub>6</sub>) für elektrische Kontakte und Verbindungen angegeben [N1], [N5]. Weiterhin wird beim Verschrauben von zwei unterschiedlich beschichteten oder einem beschichteten und einem unbeschichteten Leiter unterschieden. In der IEC [N1] ist der hohe Wert und in der ANSI IEEE [N5][N30] der niedrigere Wert der Grenztemperatur für stromführende Schraubenverbindungen in Hochspannungs-Schaltgeräten und -Schaltanlagen zugelassen. In den Normen wird dieser Widerspruch nicht begründet. Die derzeit höchste zugelassene Grenztemperatur beträgt 140 °C für Sammelschienen und Leiter aus Kupfer in Niederspannungs-Schaltgerätekominationen. Voraussetzung dafür ist, dass das Kupfer nicht entfestigt [N3].

Die zugelassene Grenztemperatur für stromführende Verbindungen mit beschichteten Leitern gilt dabei immer für die sichtbare Deckschicht (DS) des metallischen Überzugs. Das galvanische Abscheiden der metallischen Überzüge erfolgt elektrochemisch (Kapitel 2.2.1) und autokatalytisch (Kapitel 2.2.2). Die Eigenschaften der metallischen Überzugwerkstoffe unterscheiden sich abhängig vom galvanischen Beschichtungsverfahren insbesondere für elektrolytisch abgeschiedenes Nickel (Ni) und autokatalytisch abgeschiedene Legierungen aus Nickel und Phosphor (Ni-P) (Tabelle 2.7, Tabelle 2.8), [N11], [N12].

Tabelle 2.7: Physikalische Eigenschaften und Mikrostruktur metallischer Überzüge

Metallischer Überzug	Elektrolytisch beschichtet			Autokatalytisch beschichtet			
	Nickel Ni	Silber Ag	Kupfer Cu	Ni-P (Typ 2)	Ni-P (Typ 3)	Ni-P (Typ 4)	Ni-P (Typ 5)
<b>Experimentell untersucht (Kapitel 8): Deckschicht (DS) und Zwischenschicht (ZS)</b>							
	DS	DS	ZS	DS	DS	DS	ZS / DS
Massenanteil an Phosphor in %	-	-	-	≈ 3,0 [fem <sup>1</sup> , ABB <sup>2</sup> ]	≈ 4,5 [fem, ABB]	≈ 9,0 [fem]	≈ 10,6 [fem]
Mikrostruktur (Kapitel 2.2.1 und 2.2.2)	kristallin					kristallin → amorph	amorph
	Physikalische Eigenschaften (* Datenblatt)						
Dichte $\rho$ in g cm <sup>-3</sup>	8,9 [18]	10,5*	8,9 [19]	8,5 [20]		8,1 [20]	7,9*
Schmelztemperatur $\vartheta_S$ in °C	1452 [18]	960 [18]	1083 [18]	k. A.			870 ... 900*
Entfestigungs- temperatur $\vartheta_E$ in °C	250 [18]	180 [18]	190 [18]	k. A.			
Thermische Längen- ausdehnung $\alpha_L$ in 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	13,3 [18]	19,7 [18]	17,6 [19]	13 [20]		12 [20]	11 ... 13 [20]
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	92 [18]	419 [18]	> 385 [19]	k. A.			4,0 [20]
Magnetische Eigenschaften	k. A.			magnetisch		k. A.	nein*

<sup>1</sup> Messwert bestimmt durch das Forschungsinstitut Edelmetalle+Metallchemie, fem, D-73525 Schwäbisch Gmünd

<sup>2</sup> Messwert bestimmt durch ABB Switzerland Ltd. Corporate Research, CH-5405 Baden - Dättwil

Um die Haftung von metallischen Überzügen aus Silber auf den Leitern zu verbessern, werden zusätzliche Zwischenschichten (ZS) aufgebracht [N13]. Bei versilberten Aluminiumwerkstoffen werden Zwischenschichten aus Kupfer und Nickel verwendet (Kapitel 4.3), [18], [21].

Elektrolytisch abgeschiedene metallische Überzüge haben eine kristalline Mikrostruktur. Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der metallischen Überzüge entsprechen denen von reinen, schmelzmetallurgisch hergestellten Metallen, wenn sie ohne spezielle Fremdpartikel abgeschieden wurden. [22]

Zusätzliche Additive, z. B. Glanzbildner im galvanischen Elektrolyten, die Prozessparameter beim Beschichten und das zu beschichtende Werkstück beeinflussen die Eigenschaften des metallischen Überzugs [20]. Eine Besonderheit bei den autokatalytisch abgeschiedenen Überzügen aus Ni-P ist die Mikrostruktur. Überzüge aus Ni-P (Typ 5) [N12] haben nach der galvanischen Abscheidung einen amorphen Zustand. Im Vergleich zu einer kristallinen Struktur, mit einer Fernordnung der Atome im Kristallgitter, liegt nur ein ungeordneter Zustand mit Nahordnungsbereichen vor [7]. Diese Bereiche sind unter einem optischen Mikroskop nicht mehr erkennbar. Der einstellbare Phosphorgehalt in der Ni-P-Legierung beeinflusst die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des metallischen Überzugs (Tabelle 2.8).

Tabelle 2.8: Elektrische und mechanische Eigenschaften der metallischer Überzüge

Metallischer Überzug	Elektrolytisch beschichtet			Autokatalytisch beschichtet			
	Nickel Ni	Silber Ag	Kupfer Cu	Ni-P (Typ 2)	Ni-P (Typ 3)	Ni-P (Typ 4)	Ni-P (Typ 5)
<b>Experimentell untersucht (Kapitel 8): Deckschicht (DS) und Zwischenschicht (ZS)</b>							
	DS	DS	ZS	DS	DS	DS	ZS / DS
	Elektrische Eigenschaften						
Elektrische Leitfähigkeit (20 °C) $\kappa$ in MS m <sup>-1</sup>	14,6 [18]	62,9 [18]	59,6 [19][83] ]	3,3 ... 5,0 [20]		1,7 ... 2,0 [20]	0,96 (Kapitel 8.2.2)
Temperaturkoeffizient $\alpha_T$ in 10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	6,8 [18]	4,3 [18]	4,3 [19]	k. A.			
	Mechanische Eigenschaften						
Mikrohärte in HV0,001	≈ 570 [IfWW <sup>3</sup> ]	≈ 80 [IfWW]	≈ 75 [IfWW]	≈ 775 [fem]	≈ 770 [fem]	≈ 510 [fem]	≈ 515 [IfWW]
Zugfestigkeit $R_m$ in N mm <sup>-2</sup>	440 ... 850 [18]	190 ... 380 [18]	k. A.	200		800 ... 900	750 ... 900 [20]
Elastizitätsmodul $E$ in kN mm <sup>-2</sup>	216 [18]	79 [18]	110 ... 130 [19]	k. A.			170 ... 200 [20]
Duktilität in %	gut [18]	k. A.					0,4 ... 0,6 [20]
Reibungskoeffizient $\mu$	k. A.	0,15 [23]	k. A.	k. A.			0,16 ... 0,6 [20]
Innere mechanische Spannungen $\sigma_i$ in N mm <sup>-2</sup>	0 ... 3,5 (Druck)*	k. A.		-10 (Zug) [20]		±5 (Druck / Zug) [20]	+ 5 (Druck) [20]

Metallische Überzüge aus reinem, elektrolytisch abgeschiedenem Silber sind verhältnismäßig weich und haben die höchste elektrische Leitfähigkeit. Dadurch entstehen großflächige,

<sup>3</sup> Messwert bestimmt durch das Institut für Werkstoffwissenschaften, IfWW, TU Dresden

plastisch verformte stromführende Mikrokontakte in der Verbindung. Nickelüberzüge sind im Vergleich dazu hart und haben eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Die hohen Werte der Elastizitätsmoduln deuten weiterhin auf ein vorwiegend elastisches Verformungsverhalten von stromführenden Mikrokontakten hin.

Um eine ausreichend gute Haftung zwischen dem Aluminium mit einer natürlichen Aluminiumoxidschicht und dem metallischen Überzug zu gewährleisten, werden die zu beschichtenden Leiter vor dem Beschichten gereinigt, entfettet und gebeizt. Dadurch werden dicke Oxidschichten, wie sie beim Strangpressen und der Wärmebehandlung entstehen, entfernt. [5], [24], [25] In Spezialbeizen nach dem Zinkat- oder Stannatverfahren wird die Oberfläche des Aluminiums anschließend für eine gute Haftung zusätzlich aktiviert [5], [21], [22]. Dabei wird eine dünne leitende Metallzwischenschicht aus Zink oder Zinn auf der Leiteroberfläche abgeschieden um das Wachsen der natürlichen Aluminiumoxidschicht zu verhindern [25]. Das Zinkatverfahren wird üblicherweise für technische Zwecke verwendet. Beim legierten Zinkatverfahren werden Zinklegierungen aus z. B. Zn-Ni-Cu oder Zn-Ni-Fe abgeschieden. [5]

### 2.2.1 Elektrolytisches Beschichten

Metallische Überzüge aus elektrolytisch abgeschiedenem Nickel werden durch den elektrochemischen Prozess der Elektrolyse hergestellt. In einem elektrisch leitenden Bad aus gelösten Metallsalzen wird ein Gleichstromkreis zwischen einer Elektrode aus überwiegend metallischem Nickel und der zu beschichtenden Elektrode geschlossen (Bild 2.3).

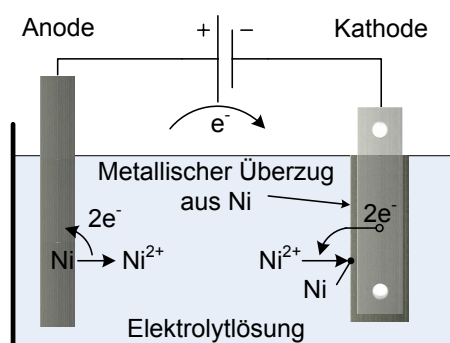


Bild 2.3: Prinzip des elektrolytischen Abscheidens eines Nickelüberzugs nach [26]

Die Anode liefert die Nickelionen für den galvanischen Abscheidungsprozess. An der negativ geladenen Kathode, z. B. eine Stromschiene aus Aluminium, reduzieren zweiwertig positiv geladene Nickelionen durch Aufnahme von zwei Elektronen zu metallisch reinem Nickel (Gl. (2)). [22]



Bei elektrolytisch abgeschiedenen Schichten kann an scharfen Kanten des zu beschichtenden Werkstücks eine dickere Schicht des metallischen Überzugs entstehen. Bei diesem Verfahren ist die galvanische Abscheidung stark abhängig von der lokalen Stromdichte. Mit einer höheren Stromdichte erhöht sich die Geschwindigkeit des Abscheidens von Überzügen mit definierter Schichtdicke. Bei extrem hohen Stromdichten sind die abgeschiedenen Überzüge nicht mehr zusammenhängend, sodass damit Metallpulver hergestellt wird. [22]

### 2.2.2 Autokatalytisches Beschichten

Das autokatalytische (chemische) Vernickeln wird außenstromlos nach dem Reduktionsverfahren durchgeführt [27]. In einem wässrigen Elektrolyt ist das Nickelsalz, meist Nickelsulfat ( $\text{NiSO}_4$ ), als Lieferant der Nickelionen ( $\text{Ni}^{2+}$ ) gelöst. Als Reduktionsmittel  $R$  ist Natriumhypophosphit ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) enthalten, das die Elektronen für die chemische Reaktion bereitstellt. Bei der chemischen Reaktion entsteht ein metallischer Überzug aus einer Legierung von Ni und P (Bild 2.4) [5], [28], [29]. Die Reduktionsreaktion beim Abscheiden des Ni-P-Überzugs, ist in erster Näherung durch die Ionen-Reaktionen (Gl. (3) ... (5)), beschrieben. [20]

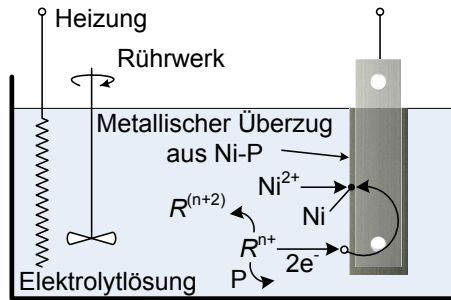
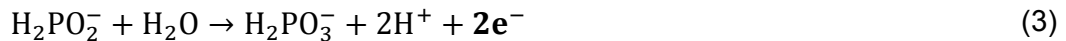


Bild 2.4: Prinzip des autokatalytischen Abscheidens von Ni-P-Überzügen (nach [20], [30])



Mit diesem Verfahren werden metallische Überzüge mit einem Massenanteil an P zwischen (1 ... 15) % abhängig vom galvanischen Elektrolyten abgeschieden. Diese metallischen Überzüge werden in fünf Typen unterschieden. Für den Typ 1 sind keine Anforderungen an den Phosphorgehalt festgelegt. Der (Typ 2) hat einen niedrigen von (1 ... 3) % und (Typ 5) einen hohen Massenanteil an P von > 10 % [N12]. Metallische Überzüge aus Ni-P sind durch eine Wärmebehandlung ausscheidungshärtbar [3], [20], [N12]. Mit zunehmenden Massenanteil an P verringert sich die elektrische Leitfähigkeit und die Korrosionsbeständigkeit erhöht sich [20], [N12]. Die hohe Korrosionsbeständigkeit des Ni-P (Typ 5) mit einem amorphen Gefüge wird darauf zurückgeführt, dass im metallischen Überzug keine Kristalle und damit auch keine Korngrenzen vorhanden sind, durch die ein Korrosionsangriff möglich wäre [5]. Durch eine Wärmebehandlung bei Temperaturen ab 200 °C kann das amorphe Gefüge in ein kristallines umgewandelt werden [22]. Die Umwandlung des Gefüges basiert auf Diffusion und der Bildung von Phosphiden im System Nickel und Phosphor [3], [20], [22], [27]. Der Übergang von einem kristallinen zu einem amorphen Gefüge von metallischen Überzügen aus Ni-P wurde bei einem Massenanteil an P von etwa 8 % ermittelt. Der spezifische elektrische Widerstand der Schicht erhöht sich dabei mit dem Phosphorgehalt ausgehend von etwa (20 ... 40)  $\mu\Omega$  cm auf Werte zwischen (100 ... 150)  $\mu\Omega$  cm (vgl. Tabelle 2.8). [29]

Im Vergleich zu metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Nickel sind die Überzüge mit dem autokatalytischen Verfahren immer konturentreu. Auch Gegenstände mit scharfen Kanten werden mit einer gleichmäßig dicken Schicht überzogen. [27]



### 3 Grundlagen zu stromdurchflossenen Flächenkontakten

Beim Kontaktieren zweier Stromschienen ist die Schraubenverbindung eine Art der technischen Realisierung für einen elektrischen Flächenkontakt. Ausgehend von der Vorstellung einer idealen mechanischen Kontaktierung mit einer homogen verteilten Kontaktkraft  $F_K$ , die auf die gesamte Überlappungsfläche  $A_{\bar{u}}$  zweier Stromschienen einwirkt, wird im Folgenden die Theorie zur elektrischen Kontaktierung erläutert (Bild 3.1).

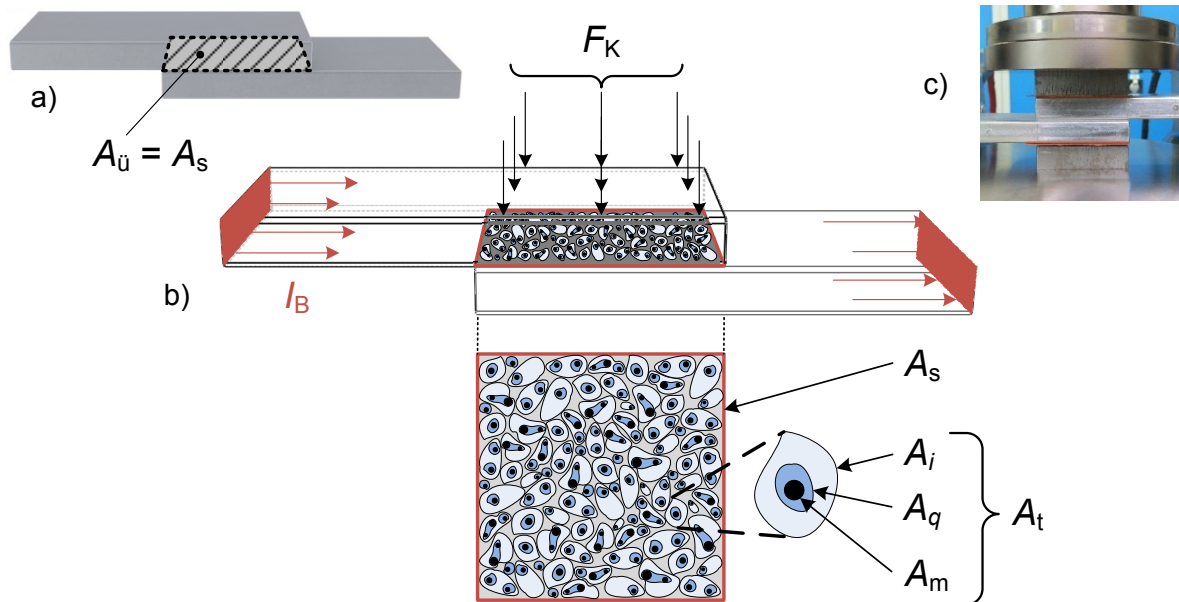


Bild 3.1: Schemata zum Kontaktieren von Flächenkontakten. a) Modell zum Flächenkontakt, b) schematische Darstellung zur Verteilung und Art der Kontaktflächen, c) experimentelle Versuchsanordnung zu diesem Modell.

Es bildet sich durch das Überlappen der beiden Stromschienen eine rechteckige, scheinbare Kontaktfläche  $A_s$ . In diesem Flächenkontakt formieren sich, unter anderem bedingt durch die Oberflächentopografie der Leiter und der Verteilung der mechanischen Spannung  $\sigma$  (Gl. (6)), nur an wenigen Stellen mikroskopisch kleine Berührungsflächen / -punkte (Bild 3.1 b)). [3], [18], [28], [31], [32], [33], [34]

$$\sigma = \frac{F_K}{A_t} \quad (6)$$

Die Summe aller Berührungsstellen bildet die mechanisch tragende Fläche  $A_t$ . Auf dieser Fläche wirkt die gesamte von außen eingeprägte Kontaktkraft  $F_K$ . Die Oberflächen der Kontaktwerkstoffe sind rau und wellig [18], [28]. Bereits beim Lagern an Umgebungsluft sind diese häufig mit einer dünnen, isolierenden Fremdschicht, z. B. Oxiden, bedeckt. Beim Verbinden der Kontaktpartner ist nur ein Teil der mechanisch tragenden Kontaktfläche auch elektrisch leitend. Die elektrisch isolierende Kontaktfläche  $A_i$  kann während der Montage einer Verbindung durch plastisches Verformen der Mikrospitzen aufbrechen. In den Bereichen freigelegten Grundmetalls werden die metallischen Kontaktflächen  $A_m$  erzeugt. Durch diese Kontaktflächen wird der größte Anteil des Betriebsstromes  $I_B$  übertragen.

Um die metallischen Kontaktflächen  $A_m$  kann sich eine sehr dünne etwa (2 ... 3) nm dicke Fremdschicht ausbilden. Über diese quasimetallische Fläche  $A_q$  ist ein Elektronenaustausch durch den Effekt des quantenmechanischen Tunnelns möglich [18], [28]. Die wahre elektrisch kontaktierende Fläche  $A_w$ , über die der Betriebsstrom  $I_B$  fließt, setzt sich aus metallischem und quasimetallischem Anteil (Gl. (7)) zusammen. Mit  $A_w / A_t < 1 \%$  [3] ist die wahre elektrisch kontaktierende Fläche  $A_w$  nur einen Bruchteil so groß bezogen auf die mechanisch tragende Kontaktfläche  $A_t$  (Gl. (8)). Den größten Flächenanteil in der scheinbaren Kontaktfläche nimmt die isolierende Kontaktfläche  $A_i$  ein, die nicht zur Stromübertragung beiträgt, aber mechanisch tragend sein kann. [3], [18], [28], [31], [32], [33], [34]

$$A_w = A_m + A_q \quad (7)$$

$$A_s \gg A_t > A_w \quad (8)$$

Basierend auf den Forschungsergebnissen zum elektrischen Kontakt- und Langzeitverhalten von stationären, stromführenden Verbindungen können prinzipielle Einflussparameter auf die Mikrokontakte verallgemeinernd angegeben werden (Bild 3.2). [2], [8], [9], [32], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44]

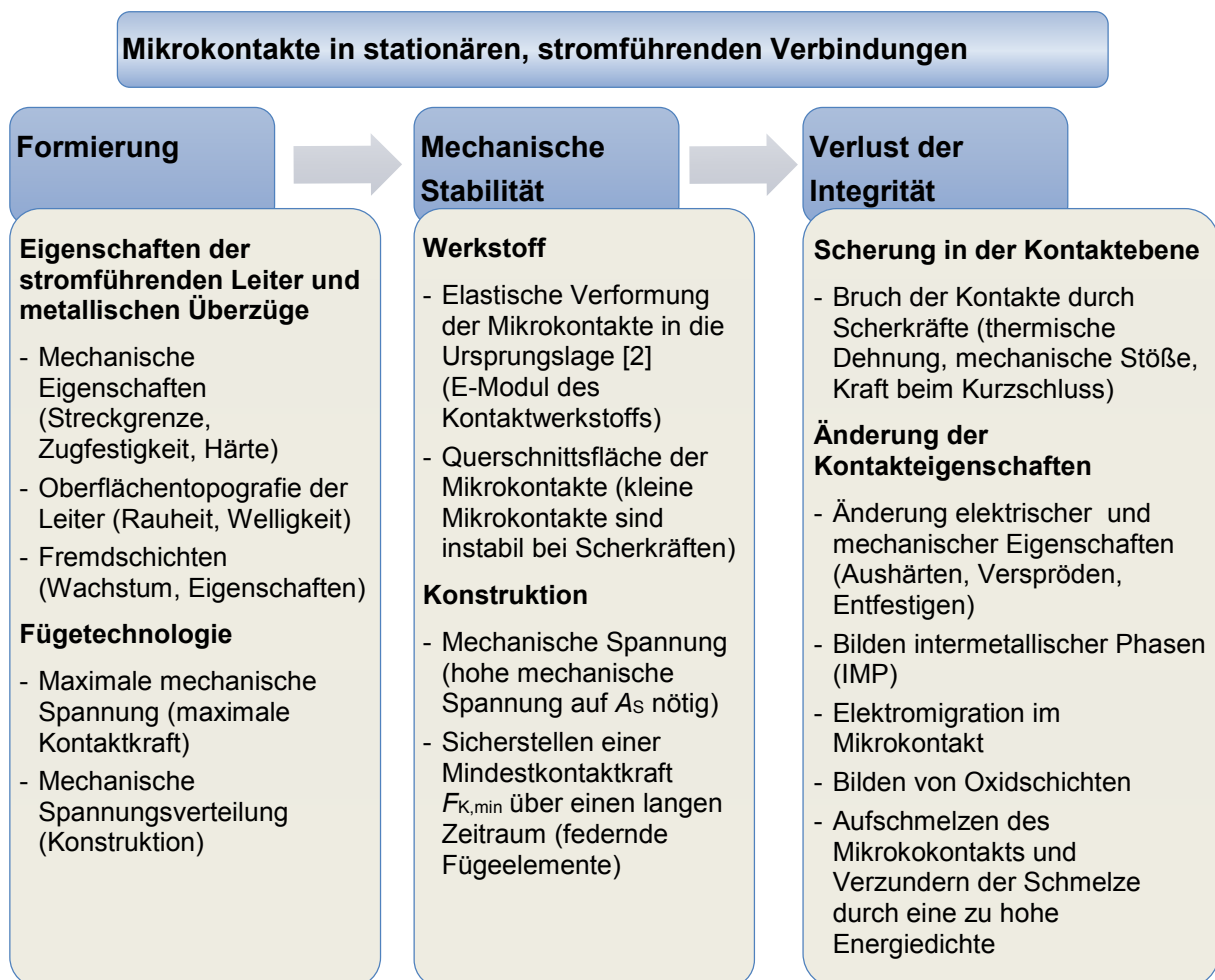


Bild 3.2: Einflussparameter und Modellvorstellungen zu Mikrokontakten in stationären Verbindungen beim Formieren während des Verbindens elektrischer Leiter, der Stabilität im Langzeitbetrieb und des Ausfalls der Kontakte durch Alterung

In der Formierungsphase (Bild 3.2) bilden sich großflächige, plastisch verformte Mikrokontakte insbesondere bei Kontaktwerkstoffen mit einem kleinen Wert der Kontakthärte  $H_K$  bei einer hohen Kontaktkraft  $F_K$  (Gl. (9), (10)), [31], [33].

$$A_t \sim \frac{1}{H_K} \quad (9)$$

$$A_t \sim F_K \quad (10)$$

Damit entstehen viele, gleichförmige und homogen auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  verteilte Mikrokontakte durch einen hohen Wert der mechanischen Spannung  $\sigma$  abhängig von der Konstruktion der Verbindung (Gl. (6)). In der Phase der relativen Ruhe ist der Verbindungswiderstand der stromführenden Verbindung oft für eine lange Zeit konstant und die Mikrokontakte stabil. Dabei wird die Kontaktkraft hauptsächlich durch die Konstruktion der Verbindung z. B. mit federnden Fügelementen aufrechterhalten. Fallen in der letzten Phase durch das kontinuierliche Altern der Verbindung viele Mikrokontakte bei der Stromleitung aus, kann die Verbindung instabil werden (Kapitel 4, Tabelle 4.1). Der Verbindungswiderstand  $R_V$  (Bild 3.3 c)) erhöht sich dann deutlich. Damit verbunden ist eine zunehmende Erwärmung der stromführenden Verbindung, die zu einem lokalen Aufschmelzen des Leiterwerkstoffs und zum Ausfall der Verbindung führen kann. [2], [8], [9], [35], [36], [37], [38], [39], [40]

### 3.1 Kontaktverhalten in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen

Der Betriebsstrom  $I_B$  von Stromschiene 1 zu Stromschiene 2 fließt durch die Mikrokontakte und teilt sich in der Verbindung (Bild 3.3 a) und b)) in parallele Strompfade  $I_{B,(n)}$  auf (Gl. (11)).

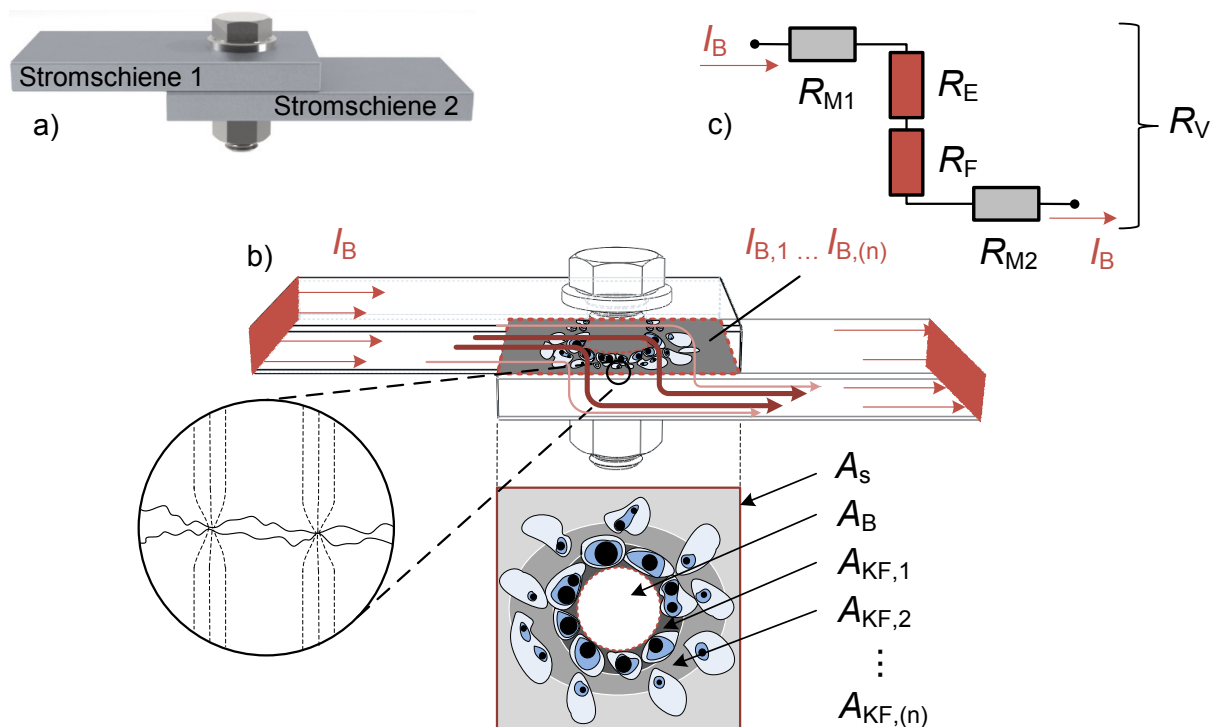


Bild 3.3: Kontaktieren am Beispiel der Schraubenverbindung (schematisch)  
a) Schraubenverbindung mit Stromschienen, b) Verteilung der Kontaktflächen und der Durchströmung, c) Ersatzschaltbild

$$I_B = \sum_{i=1}^n I_{B,(i)} \quad (11)$$

Jeder Teilstrompfad  $I_{B,(i)}$  wird abhängig vom Querschnitt der Mikrokontakte eingeschnürt. Dadurch erhöht sich lokal die Stromdichte in der Verbindung gegenüber dem homogen durchströmten Leiter. Im Ersatzschaltbild (Bild 3.3 c)) einer Schraubenverbindung mit Stromschienen wird das mit dem Engewiderstand  $R_E$  beschrieben. Im Engewiderstand wird der Eigenanteil und Interaktionsanteil zusammengefasst. Der Eigenanteil  $R_{E,Eigen}$  ist bestimmt durch die Geometrie des einzelnen Mikrokontakts und beschreibt die Einschnürung des Stromes im einzelnen Mikrokontakt. Der Interaktionsanteil  $R_{E,la}$  beschreibt die gegenseitige Beeinflussung der Strömungsfelder zwischen den Mikrokontakten, je nach räumlicher Verteilung und Abstand der Mikrokontakte zueinander (Gl. (12)), [8], [32], [37].

$$R_E = R_{E,Eigen} + R_{E,la} \quad (12)$$

Eine gegenseitige Beeinflussung der Mikrokontakte ist gegeben, wenn der Abstand zwischen ihnen, z. B. bei einer regelmäßigen Verteilung im quadratischen Netz, den zehnfachen Durchmesser der Mikrokontakte unterschreitet [8], [32].

Der Fremdschichtwiderstand  $R_F$  beschreibt den Einfluss der reduzierten Stromübertragung durch fremdschichtbehaftete, mechanisch tragende Kontaktfläche. Für dünne Fremdschichten mit einer Dicke von  $< (2 \dots 3)$  nm wirkt ein halbleitender Hautwiderstand [43], [45]. Bei dickeren Fremdschichten wird der Fremdschichtwiderstand mit der stoffspezifischen elektrischen Leitfähigkeit z. B. der Oxidschicht berechnet [34], [43]. Auf Leitern aus Aluminiumwerkstoffen und metallischen Überzügen aus Nickel bilden sich innerhalb kurzer Zeit elektrisch isolierende Oxidschichten bereits bei Raumtemperatur (Kapitel 4.1, Tabelle 4.2). Im Kontaktwiderstand  $R_K$  werden die Beträge des Widerstands durch die Einengung und die Fremdschichten zusammengefasst (Gl. (13)).

$$R_K = R_E + R_F \quad (13)$$

$$R_K \sim F_K^{-m} \quad (14)$$

Für fremdschichtbehaftete, elektrische Kontakte wird mit dem Parameter  $m$ , für verschiedene Geometrien und Werkstoffkombinationen ( $0,3 \leq m \leq 3$ ), eine exponentielle Abhängigkeit zwischen dem Kontaktwiderstand  $R_K$  und der Kontaktkraft  $F_K$  angegeben (Gl. (14)), [45]. In [18], [28] wurden dazu Faktoren für die Mikrooberfläche und Reinigung der Kontaktflächen empirisch bestimmt. Prinzipiell formieren sich durch eine hohe Kontaktkraft  $F_K$  viele Mikrokontakte und Fremdschichten werden aufgebrochen. Dadurch kann sich der Kontaktwiderstand bis zu einem Minimalwert verringern (Bild 3.4 a)).

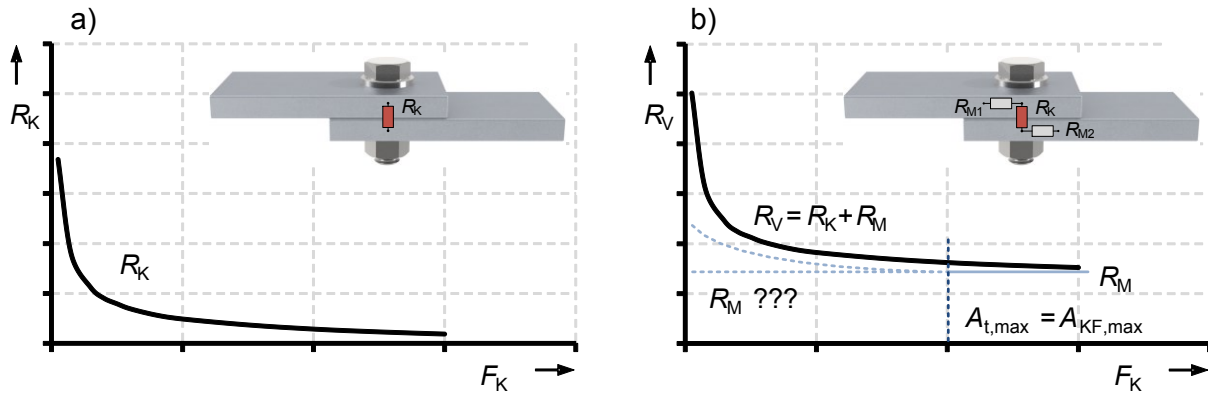


Bild 3.4: Schemata zum Verhalten des a) Kontaktwiderstands  $R_K$  und b) des Verbindungswiderstands  $R_V$  abhängig von der Kontaktkraft  $F_K$  und des tatsächlich durchströmten Materialanteils der Stromschienen  $R_M$  durch die Kontaktfläche  $A_{KF}$

In der Praxis kann konstruktionsbedingt nur der Verbindungswiderstand  $R_V$ , mit z. B. einem Mikroohmmeter (Bild 3.5), an der spezifischen Verbindung gemessen werden (Bild 3.4 b)). Der Verbindungswiderstand ist die Summe aus dem Kontaktwiderstand  $R_K$  und dem Widerstand des tatsächlich stromdurchflossenen Materials abhängig von der Stromdichteverteilung in der Verbindung (Gl. (15), Kapitel 7.1).

$$R_V = R_K + R_M \quad (15)$$

Der elektrische Widerstand des tatsächlich stromdurchflossenen Materials  $R_M$  wird auch als Bahnwiderstand bezeichnet [32] und ist experimentell nicht getrennt von  $R_K$  zu bestimmen. Durch das Umlenken des Stromes von Stromschiene 1 zu Stromschiene 2 (Bild 3.3 a), b)) wird nicht die gesamte Fläche  $A_s$  der sich überlappenden Stromschienen zur Erzeugung von Mikrokontakten genutzt. Während des Verspannens einer realen Schraubenverbindung mit Stromschienen verteilt sich die mechanische Spannung in einem Druckkegel radial um das Bohrloch  $A_B$  (Bild 3.3 b)) herum. Mit zunehmender Kontaktkraft erhöht sich damit die mechanische Spannung im Druckkegelbereich und vergrößert sich die mechanisch tragende Kontaktfläche  $A_t$  bis zu dem Maximalwert  $A_{t,max}$  (Bild 3.4 b)).

Dadurch wird die Stromdichteverteilung makroskopisch wie bei einem Trichter durch die maximale radiale Ausdehnung der mechanisch tragenden Fläche  $A_{t,max} = A_{KF,max}$  im Druckkegel der Schraube (vgl. Bild 3.3 b)) und im Mikroskopischen durch das Einengen in den einzelnen Mikrokontakten beeinflusst. Nach dem Ausbilden des vollständigen Druckkegels, mit einer Fläche  $A_{t,max}$ , vergrößert sich nur noch der Anteil zwischen wahrer zu mechanisch tragender Kontaktfläche  $A_w / A_{t,max}$  durch das Verformen der Mikrospitzen mit lokal hohen Werten der mechanischen Spannung  $\sigma$ . In diesem Kontaktkraftbereich nähert sich der Verbindungswiderstand  $R_V$  dem minimalen Materialwiderstand  $R_M$  an (Bild 3.4 b)). [46]

Insbesondere bei stromdurchflossenen Flächenkontakten mit einem kleinen Verhältnis zwischen mechanisch tragender und scheinbarer Kontaktfläche  $A_t / A_s$  ist der durchströmte Materialanteil, im Vergleich zu punktförmigen Kontakten, unbekannt. In einer realen Schraubenverbindung mit Stromschienen verteilen große biegesteife Fügeelemente (Bild 3.1 c)) die eingeprägte Kontaktkraft  $F_K$  radial weiter um die Bohrungen herum, als kleine nachgiebige Unterlegscheiben mit begrenztem Durchmesser (Bild 3.3 a), Tabelle A. 3), [8].

Dadurch unterscheidet sich die maximale mechanisch tragende Fläche  $A_{t,max}$  für beide Systeme. Die mechanische Spannungsverteilung wird deswegen bei Verbindungen mit kleinen Unterlegscheiben inhomogener und sich großflächige Mikrokontakte nur in der Nähe der Bohrung formieren. Im Abschnitt der Kontaktfläche  $A_{KF,1}$  (Bild 3.3 b)) wird damit auch der Anteil des übertragenen Betriebsstromes größer sein als in der Kontaktfläche  $A_{KF,2}$ .

In dieser Arbeit wurde das elektrische Kontaktverhalten in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Aluminium und Unterlegscheiben der normalen Reihe [N24] zur mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  korreliert (Kapitel 7.1.2, Tabelle 7.6).

### 3.2 Gütefaktor zum Beurteilen der Qualität der stromführenden Verbindung

Das elektrische Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen kann werkstoffunabhängig mit dem Gütefaktor  $k_u$  bewertet werden (Gl. (16)). [32]

$$k_u = \frac{R_V}{R_{Mat}} = \frac{P_V}{P_{Mat}} \quad (16)$$

Der Gütefaktor wird aus dem Verhältnis des gemessenen Verbindungswiderstands  $R_V$  zum Widerstand des Materials eines homogen durchströmten Leiterabschnitts  $R_{Mat}$  berechnet (Bild 3.5). Durch die doppelte, stromführende Querschnittsfläche der Stromschienen im Bereich der Überlappung  $l_{\bar{u}}$  ist theoretisch ein Gütefaktor von  $k_u = 0,5$  möglich. Voraussetzung dafür sind Stromschienen gleicher Abmessungen bei einer Länge  $l_{\bar{u}}$ , die dem Vierfachen der Schienendicke entspricht [32], [39]. Numerische Berechnungen des elektrischen Strömungsfeldes in der Verbindung zeigen, dass dieser theoretische Wert auch bei idealen Bedingungen  $R_K = 0 \mu\Omega$  nicht erreicht werden kann (Kapitel 7.1.2, Tabelle 7.6). [36]

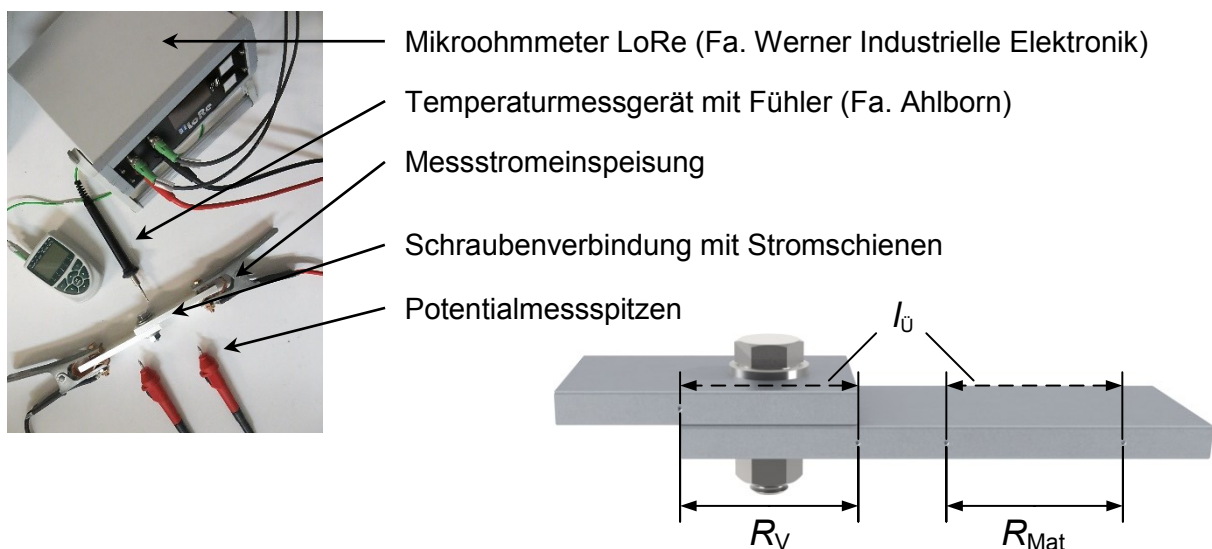


Bild 3.5: Anordnung zum Messen des elektrischen Widerstands der Verbindung  $R_V$  und des homogen durchströmten Materials  $R_{Mat}$  für die Länge  $l_{\bar{u}}$  der überlappenden Stromschienen in einer Schraubenverbindung

Generell gilt, dass bei einem Gütefaktor von  $k_u = 1,0$  in der stromführenden Schraubenverbindung ( $P_V$ ) und im homogenen Leiter ( $P_{Mat}$ ) die identische Verlustleistung erzeugt wird.



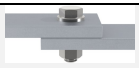
Im Allgemeinen wird die Übertemperatur an der Oberfläche der Verbindung trotzdem geringer sein als auf der Leiteroberfläche des homogen durchströmten, thermisch unbeeinflussten Leiters. Die radial wärmeabgebende Oberfläche durch Konvektion und Wärmestrahlung ist durch die Überlappung der Stromschienen und der ebenfalls erwärmten Fügeelemente größer, als die des homogenen Leiters.

Für Schraubenverbindungen mit Stromschienen unterschiedlicher Abmessungen wurde ein nötiger Anfangswert des Gütefaktors  $k_{u0}$  nach der Montage bestimmt [36]. Dieser Wert stellt eine notwendige Bedingung für eine langzeitstabile Verbindung dar. Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium in den hier untersuchten Abmessungen (Tabelle 6.3) sollten demnach einen Anfangsgütefaktor von  $k_{u0} \leq 1,5$  haben. Schraubenverbindungen mit einem Gütefaktor  $k_{u0} \geq 1,5$  nehmen im Betrieb mit dem Bemessungsstrom eine höhere Temperatur an der Verbindung im Vergleich zum homogenen Leiter an ( $\vartheta_v > \vartheta_L$ ). Damit würde diese Verbindung unter realen Bedingungen entsprechend des Arrhenius-Gesetzes schneller altern als in experimentellen Untersuchungen an stromführenden oder stromlos im Wärmeschränk gelagerten Verbindungen bei konstanter Temperatur (Kapitel 4). Bei einem Grenzgütefaktor ab etwa  $k_{u,Grenz} = 7,0$  wird angenommen, dass es durch die hohe Verlustleistung in den einzelnen Mikrokontakten zu lokalen Aufschmelzungen des Leiterwerkstoffs kommt. Damit verbunden ist ein instabiler elektrischer Kontakt, dessen weiteres zeitabhängiges Verhalten nicht mehr physikalisch definierbar ist. Das Langzeitverhalten einer stromführenden Verbindung ist damit wesentlich von der Qualität der Montage abhängig. [36]

## 4 Alterung stromführender Verbindungen

Stromführende Verbindungen altern durch die derzeit bekannten Mechanismen (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Bekannte Alterungsmechanismen stromführender Verbindungen [2], [3], [38]

Bezeichnung / Mechanismus	Ursache	Wirkung in der Verbindung	
Chemische Reaktionen	Chemische Reaktionen der Leiterwerkstoffe mit umgebenden Medien (Öl, Luft, H <sub>2</sub> O, Industrieatmosphäre [44])	Bildung elektrisch isolierender / halbleitender Fremdschichten reduziert die wahre Kontaktfläche $A_w$ . Galvanische Korrosion bei Bimetall-Verbindungen in feuchter Umgebung.	Ja
Kraftabbau	Zeitabhängige plastische Verformung der Leiterwerkstoffe und Fügeelemente aktiviert durch hohe mechanische Spannung und Temperatur	Reduzieren der Kontaktkraft bis unter die Mindestkontaktkraft $F_{K,min}$ durch Setzen, Spannungsrelaxation und / oder Kriechen der Leiterwerkstoffe. Zusätzliche Materialentfestigung durch Verändern der Mikrostruktur.	Ja
Interdiffusion	Thermisch aktiviertes Durchmischen zweier in Kontakt stehender Metalle	Bilden von intermetallischen Phasen (IMP) mit veränderten physikalischen und mechanischen Eigenschaften	Ja
Elektromigration	Materialtransport zwischen mechanisch kontaktierten Metallen durch gerichteten Iontentransport, aktiviert durch hohe Stromdichten	Elektrostatische Kraft auf Elektronen bedingt durch ein von außen angelegtes elektrisches Feld. Bilden von Leerstellen im Werkstoff. Veränderte mechanische Eigenschaften in der Grenzfläche.	AC -Nein DC - ?
Reibverschleiß	Tribologischer Verschleiß / Abtrag von Leiterwerkstoff	Lokale Gefügeveränderung Furchung, Partikel in der Kontaktfläche	Nein

Nach dem Fügen von elektrischen Leitern zu einer stromführenden Verbindung können sich der Kontakt- und der Verbindungswiderstand, innerhalb kurzer Zeit bereits bei normaler Umgebungstemperatur, erhöhen. Das Altern durch chemische Reaktionen an den Kontaktoberflächen (Kapitel 4.1), der Kraftabbau (Kapitel 4.2) und die Interdiffusion mit der Bildung von intermetallischen Phasen (IMP) (Kapitel 4.3) sind in der Schraubenverbindung dominant. Die Alterungsmechanismen sind abhängig von der Temperatur und der Zeit. Vor allem diffusionsgesteuerte Prozesse, wie beim Bilden von IMP (Kapitel 4.3), laufen bei hoher Temperatur schneller ab und können mit der Arrhenius-Gleichung (Gl. (26)) beschrieben werden. Dauerbeanspruchte, stromführende Verbindungen altern damit im Allgemeinen schneller als bei einer thermischen Wechsellast mit geringer mittlerer Temperatur [2], [38]. Die verschiedenen Alterungsmechanismen wirken zeitgleich, können aber während der Betriebszeit abwechselnd das Altern dominieren.

Mit zunehmendem Verbindungswiderstand wird bei Belastung mit dem Bemessungsstrom eine immer höhere Verlustleistung in der Verbindung erzeugt, die über Wärmeleitung, sowie Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Durch Wärmeleitung werden auch die angeschlossenen Leiter, entsprechend der thermischen Ortskonstanten  $b$  [32], indirekt durch die Wärmequelle an der Verbindung beeinflusst. Die erhöhte Temperatur kann damit z. B. bei angeschlossenen Leitern aus dem ausscheidungsgehärteten Al MgSi(B) oder dem kaltverfestigten Al 99,5(A) H14 zu einer irreversiblen, zeitabhängigen Werkstoffentfestigung führen (Kapitel 4.2.2). Im Fehlerfall und hohen Kurzschlussströmen können die Leiter dann durch die zusätzlichen elektromagnetischen Kräfte unzulässig plastisch verformt und Mindestabstände zwischen Betriebsmitteln in der elektrischen Anlage unterschritten werden. Bereits bei der Dimensionierung ist, entsprechend der zulässigen Grenztemperaturen in der elektrischen Anlage, das Entfestigen des Leiterwerkstoffs unzulässig [N3].

#### 4.1 Chemische Reaktionen

Auf den Werkstoffen für elektrische Leiter und metallische Überzüge entstehen häufig Fremdschichten im Temperaturbereich bis 200 °C (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Fremdschichten auf Werkstoffen elektrischer Leiter und metallischer Überzüge im Temperaturbereich bis 200 °C [3], [8], [34], [43], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53]

Parameter	Aluminium(III)-Oxid $\text{Al}_2\text{O}_3$	Kupfer(I)-Oxid $\text{Cu}_2\text{O}$	Nickel(II)-Oxid (NiO)	Silber(I)-sulfid ( $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ )
Entstehen im Temperaturbereich	Immer	Immer	Immer	Bis 179 °C
Dichte $\rho$ in $\text{g cm}^{-3}$	3,97	5,8 ... 6,1	7,45	7,3
Schmelztemperatur $T_s$ in °C	2.050	1.242	1.957	Keine Angabe
Härte in Vickers (HV)	2.060	109 ... 189	535 ... 550	36 ... 60
Spezifischer elektrischer Widerstand (20 °C) $\rho_{el}$ in $\Omega \text{ m}$	$1,0 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{11}$	3,6
Thermische Leitfähigkeit $\lambda$ in $\text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}$	40	6,3 ... 8	12,3 (bei 100 °C)	Keine Angabe
Thermische Längenausdehnung (20 ... 200) °C $\alpha_L$ in $\text{K}^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	Keine Angabe	Keine Angabe	$14,0 \cdot 10^{-6}$



Insbesondere Oxidschichten haben wesentlich höhere spezifische elektrische Widerstände als die reinen Werkstoffe (vgl. Tabelle 2.2, Tabelle 2.7, Tabelle 2.8). Fremdschichten entstehen abhängig vom umgebenden Medium (Luft, Öl, SF<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>O), der Temperatur und der Zeit durch chemische Reaktionen auf der Kontaktfläche. Dringen diese Fremdschichten von außen in die stromführenden Mikrokontakte ein, reduziert sich die wahre Kontaktfläche  $A_w$  (Kapitel 2, Gl. (7)) und der Kontaktwiderstand  $R_K$  der Verbindung erhöht sich (Kapitel 3.1, Gl. (13)). Der Kontaktwiderstand ist ebenfalls hoch, wenn zwei fremdschichtbehaftete Stromschienen gefügt oder im stromführenden Betrieb einer Schraubenverbindung durch Versatzbewegungen im nm- bis  $\mu$ m-Bereich Mikrokontakte getrennt und auf Fremdschichten neu kontaktiert werden. Auf der Oberfläche von Aluminium bildet sich bereits bei normaler Umgebungstemperatur innerhalb kurzer Zeit eine harte, transparente und elektrisch isolierende Oxidschicht mit einer Dicke von wenigen Nanometern [1], [3], [4], [18], [33], [34], [43]. Für einen kleinen Wert des Fremdschichtwiderstands wird diese Schicht vor dem Fügen einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Aluminium durch Bürsten mit einer Stahldrahtbürste entfernt [2], [3], [32] [35], [36], [37], [38], [39].

#### Fremdschichten auf metallischen Überzügen aus Silber:

Auf metallischen Überzügen aus Silber bilden sich im Temperaturbereich bis 200 °C verhältnismäßig weiche Fremdschichten. Eine starke Konzentration von Ozon in der Umgebungsluft führt zu Silber(I)-oxid (Ag<sub>2</sub>O) auf der Oberfläche. Dieses Oxid haftet nur lose an der Oberfläche und zersetzt sich bei Temperaturen über 200 °C wieder. Das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten von stromführenden Verbindungen ist von dieser Oxidschicht nicht signifikant beeinflusst. [3], [33]

In schwefelhaltiger Atmosphäre kann Silber(I)-sulfid Ag<sub>2</sub>S in mehreren Modifikationen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) entstehen. Die Umwandlungen der  $\alpha$ - in die  $\beta$ -Modifikation findet bei 179 °C und die  $\beta$ - in die  $\gamma$ -Modifikation bei 586 °C statt. Das Sulfid bildet sich bei Kontakt des Silbers mit Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) [47]. Die Sulfidschichten sind relativ weich im Vergleich zum metallischen Überzug aus Silber (Tabelle 2.7, Tabelle 4.2) und werden durch eine hohe Kontaktkraft, z. B. bei Kontakten in Schaltgeräten, aufgebrochen [18].

#### Fremdschichten auf metallischen Überzügen aus Nickel:

Auf Nickeloberflächen bildet sich in normaler Umgebungsluft eine harte, dichte und elektrisch isolierende Oxidschicht (Tabelle 4.2) [33]. Diese Oxidschicht wirkt schon bei geringer Dicke passivierend und verhindert damit die weitere Oxidation des darunter liegenden Nickels. Das Oxidschichtwachstum ist bei Raumtemperatur gering. Es bildet sich nach einer Zeit von 1.000 h bei einer Temperatur von 20 °C eine Oxidschicht mit einer Dicke von 1,6 nm. [3]

Nach [31] wurde eine Schicht Nickel(II)-Oxid (NiO) mit einer Dicke von (6 ... 7) nm für Nickel in trockener Luft nach einer Zeit von 50 Jahren bei einer Temperatur von 140 °C berechnet. Vor dem Fügen von Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium und metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni oder autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) ist eine abrasive Reinigung der Kontaktflächen notwendig um Gütefaktoren von  $k_{u0} < 1,5$  nach der Montage zu erreichen (Kapitel 6.3) [54].

## 4.2 Kraftabbau in einer Schraubenverbindung

Beim Altern der Verbindungen durch Kraftabbau wird das Trennen von stromführenden Mikrokontakten durch das Verringern der Kontaktkraft unter einen Mindestwert  $F_{K,min}$  verstanden. Dadurch verringert sich die wahre elektrische Kontaktfläche  $A_w$  und es erhöhen sich der Kontakt- und Verbindungswiderstand. Der Kraftabbau beginnt in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen sofort nach der Montage durch einen näherungsweise zeitunabhängigen (Kapitel 4.2.1) und während des Betriebs durch einen zeit- und temperaturabhängigen Anteil (Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Beide Anteile verursachen eine Dehnung / Stauchung  $\varepsilon$  der Werkstoffe in Richtung der mechanischen Belastung (Gl. (17) ... (19)). Über die Gestaltung der Verbindung mit verschiedenen Fügeelementen sind diese Dehnungsanteile vom Wert der mechanischen Spannung und deren Verteilung abhängig. Eine bleibende Stauchung (negative Dehnung) der Stromschienen in Richtung der Vorspannkraft der Schraube führt zu einem Abbau der Kontaktkraft in der Verbindung.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (17)$$

$\Delta l$  ... Längenänderung  
 $l_0$  ... Anfangslänge

$$\varepsilon = f(\sigma) \quad \begin{array}{l} \text{Elastische und plastische Verformung des Werkstoffs} \\ \text{(Kapitel 4.2.1)} \end{array} \quad (18)$$

$\sigma$  ... mechanische Spannung

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T) \quad \begin{array}{l} \text{Zeitabhängige plastische Verformung durch den} \\ \text{physikalischen Vorgang Kriechen (Kapitel 4.2.2 und 4.2.3)} \end{array} \quad (19)$$

$t$  ... Zeit  
 $T$  ... absolute Temperatur

Folgende Ursachen werden für das Verringern der Vorspannkraft der Schraube und damit der Kontaktkraft in einer Einschraubenverbindung gegenüber dem Montagezustand angegeben [N14]:

- Anziehen weiterer Schrauben in der Umgebung
- Setzen der Kontaktflächen
- Selbsttätiges Losdrehen der Schraube durch, z. B. Vibration
- Relaxation der Werkstoffe
- Temperaturwechsel / thermische Dehnung der verspannten Teile und der Schraube
- Überlastung der Verbindung / plastisches Verformen der Schraube

### Setzen der Kontaktflächen:

Ausgehend von den Angaben zum Abbau der Vorspannkraft der Schraube in der Norm beginnt der Kraftabbau in den hier untersuchten stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium mit dem Setzen. Die Schraube mit der Länge  $l_{S(t=0)}$  zum Zeitpunkt ( $t = 0$ ) wird durch das gegenseitige Verspannen der Stromschienen und weiterer Fügeelemente auf eine Länge  $l_{S(t=1)}$  nach der Montage ( $t = 1$ ) um den Betrag  $\Delta l_S$  elastisch

gedehnt (Bild 4.1). Die Klemmlänge  $l_K$  definiert dabei den Abstand zwischen der Kopfauf-  
fläche der Schraube und der Mutterauflagefläche.

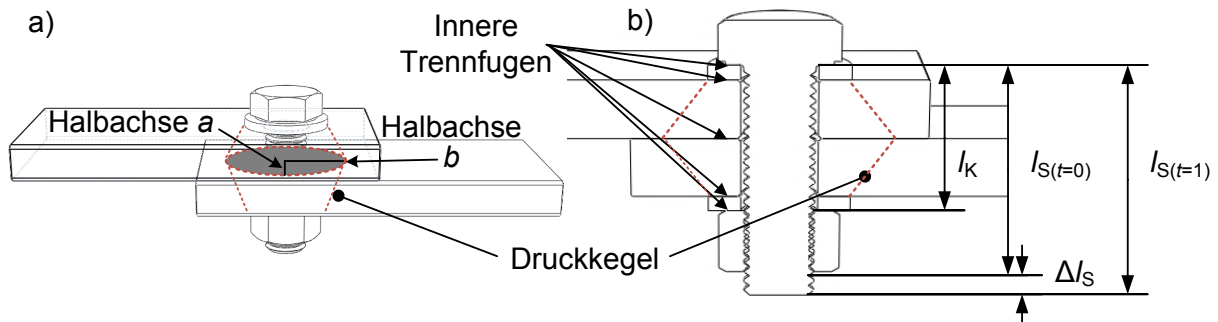


Bild 4.1: Mechanischer Kontakt in der Schraubenverbindung a) Ausbreitung eines Druckkegels und einer elliptischen mechanischen Kontaktfläche mit den Halbachsen  $a$  und  $b$ . b) innere Trennfugen und Dehnung der Schraube beim Verspannen. (schematisch)

Die maximale radiale Ausdehnung der mechanischen Spannung entlang der Klemmlänge  $l_K$  kann analytisch durch Ersatzverformungskörper, z. B. Kegel und Hohlzylinder, berechnet werden (Kapitel 7.1.1), [N14], [55]. Bei einer zentrisch verspannten Einschraubenverbindung bildet sich eine mechanische Spannungsverteilung, die z. B. durch zwei Kegelstümpfe mit einem konzentrischen Hohlzylinder für die Bohrung angenähert werden kann. Bei einer freien radialen Ausdehnung der mechanischen Spannung, abhängig von der Höhe der verspannten Stromschienen, bildet sich in der Trennfuge zwischen den Stromschienen die mechanische Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$  (Bild 7.3). Diese ist konzentrisch zum Bohrloch. Analytisch wird dafür der Flächeninhalt eines Kreises berechnet [N14], [35], [55]. Abhängig von der Geometrie der Stromschienen kann diese Fläche in realen Schraubenverbindungen auch eine elliptische Form (Bild 7.4) mit den Halbachsen  $a$  und  $b$  annehmen (Bild 4.1, vgl. Tabelle A. 3).

Im verspannten Zustand nach der Montage werden mikroskopisch kleine Oberflächenrauheiten an den Stromschienen und Fügeelementen in allen inneren Trennfugen der Verbindung, sowie auf den Gewindeflanken von Schraube und Mutter zunächst elastisch und anschließend plastisch verformt (Kapitel 4.2.1). Dadurch wird ein Anteil von der ursprünglich gedehnten Länge der Schraube  $l_{S(t=1)}$  wieder abgebaut  $l_{S(t=2)}$  (Gl. (20)).

$$l_{S(t=2)} = l_{S(t=0)} + \Delta l_S - n \cdot \Delta s \quad (20)$$

mit einer Anzahl an  $n$  Trennfugen

In der Schraubenverbindung mit Stromschienen reduziert sich dadurch die Kontaktkraft. Der Anteil des Setzbetrages  $\Delta s$  beträgt für jede innere Trennfuge etwa  $(1,5 \dots 6,5) \mu\text{m}$  und ist abhängig von den Oberflächenrauheiten der eingesetzten Werkstoffe, sowie der mechanischen Spannung auf den Kontaktflächen. [N14], [55] Schraubenverbindungen mit Dehnmessschrauben und Unterlegscheiben der normalen Reihe [N24] im System M12 (Kapitel 6.2.1), sowie Stromschienen aus Al 99,7 haben bei einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  einen Setzbetrag von etwa  $\Delta s = 10 \mu\text{m}$  bezogen auf eine Dehnung der Schraube von  $\Delta l_{S, \text{OFF}} = 70 \mu\text{m}$  bei der Montage (Kapitel 6.4). Das entspricht einem Abbau der Kontaktkraft um etwa  $F_{\text{Setz}} = 3,5 \text{ kN}$  (Kapitel 7).

### Zeit- und temperaturabhängige Vorgänge:

Die zeit- und temperaturabhängigen Vorgänge Spannungsrelaxation und Kriechen können in einer Verbindung zum Kraftabbau führen [8], [9], [35], [37], [41]. In einer Schraubenverbindung mit Stromschienen überlagern sich diese beiden physikalischen Vorgänge nach [56] zu einer Spannungsrelaxation mit einem Kriechverformungsanteil. Bei dieser Art der Relaxation führt die Kriechverformung, abhängig von einer inhomogenen mechanischen Spannungsverteilung, zu einer makroskopischen Formänderung der Werkstoffe [8], [35]. Unabhängig von dieser zeitabhängigen Verformung können sich die Werkstoffe zusätzlich zeit- und temperaturabhängig entfestigen (Kapitel 4.2.2). Das Entfestigen des Werkstoffs kann den Kraftabbau in der Verbindung noch beschleunigen.

Spannungsrelaxation beschreibt den Abbau einer inneren mechanischen Spannung in den von außen mechanisch belasteten Werkstoffen. Mit der Annahme, dass die Stromschienen in der Schraubenverbindung um einen konstanten Wert  $\varepsilon$  gestaucht werden und sich dieser Wert nicht ändert, würde sich die erzeugte mechanische Spannung bis zu einem neuen Gleichgewichtszustand verringern. Zum Abbau der mechanischen Spannung führen verschiedene physikalische Mechanismen, die die elastische Dehnung in eine Plastische umwandeln. Durch die bleibende Verformung des Werkstoffs wird ein energetisch günstigerer Zustand erreicht und innere mechanische Spannungen abgebaut.

Kriechen ist ein physikalischer Vorgang, der zeit- und temperaturabhängig zu einer plastischen Verformung des Werkstoffs z. B. der Stromschienen unter konstanter mechanischer Last führt. In einer Schraubenverbindung mit Stromschienen ist die mechanische Spannung (Last) inhomogen verteilt und verringert sich durch die Spannungsrelaxation zeitabhängig. Während der Betriebszeit führen damit unterschiedliche thermisch und mechanisch aktivierte Kriechmechanismen zum Kraftabbau in der Verbindung (Kapitel 4.2.3).

#### 4.2.1 Elastische und plastische Verformung

Beim Montieren der Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium verformen sich die Werkstoffe zunächst elastisch und beim Überschreiten der werkstoffspezifischen Fließgrenze plastisch. Zum Bestimmen dieser Grenze zwischen der elastischen und plastischen Verformung des Werkstoffs werden überwiegend einachsige Zugversuche nach [N15] durchgeführt. An Werkstoffproben mit genormten Formen und Abmessungen nach [N16] wird in den Zugversuchen dieser Wert als Streckgrenze  $R_p$  bestimmt. Eine elastische Verformung ist reversibel. Der Widerstand eines Werkstoffs gegen eine elastische Verformung durch das Verschieben der Atome aus ihrer Gleichgewichtslage (Gitterverzerrungen) ist das Elastizitätsmodul  $E$ . [7], [11], [57]

Je nach Wirkrichtung können auf der Oberfläche eines Leiters Normalspannungen  $\sigma_N$  senkrecht zur betrachteten Fläche  $A$  und Schubspannungen  $\tau$  parallel dazu (Scherung) auftreten. Bei den hier untersuchten Einschraubenverbindungen mit Stromschienen ist hauptsächlich von einer in Normalrichtung, senkrecht auf die mechanisch tragende Kontaktfläche  $A_t$  wirkenden mechanischen Spannung auszugehen (Gl. (6)). Sind die Werkstoffe isotrop und damit die Werkstoffeigenschaften in allen Raumrichtungen gleich, besteht für den Bereich des elastischen Verformens ein linearer Zusammenhang zwischen,

z. B. der mechanischen Normalspannung  $\sigma_N$  und der Dehnung  $\varepsilon$  des Werkstoffs, nach dem Hooke'schen Gesetz (Gl. (21), (22)). Die Beziehung zwischen der Normal- und der Schubspannung bildet die Querkontraktionszahl  $\nu$  (Gl. (23)). [7], [11], [57]

$$\sigma_N = \varepsilon \cdot E \quad (21)$$

$\varepsilon$  ... Dehnung / Stauchung

$E$  ... Elastizitätsmodul

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (22)$$

$\gamma$  ... Schubverzerrung

$G$  ... Schubmodul

$$\nu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad (23)$$

$\nu$  ... Querkontraktionszahl (Poissonsche Zahl)

Bei einer mechanischen Beanspruchung des Werkstoffs über den Wert der Streckgrenze  $R_p$ , verformt sich dieser plastisch. Die Träger der Plastizität sind die Versetzungen im Kristall (Kapitel 2.1.1), [7], [10], [11]. Das Gleiten von Stufen- und Schraubenversetzungen hat dabei einen wesentlichen Einfluss. Durch Hindernisse im Gleitweg, z. B. Fremdatome in legierten Aluminiumwerkstoffen, ist die mechanische Festigkeit höher und die plastische Verformbarkeit geringer. Da bei Werkstoffen aus Aluminium die Streckgrenze  $R_p$  üblicherweise nicht sehr genau bestimmt werden kann, wird der Wert für die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  verwendet. Bei diesem Wert ist eine Zugprobe um 0,2 % irreversibel gedehnt. Bis zum Wert der Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffs erhöht sich die mechanische Spannung mit der Dehnung, obwohl eine plastische Verformung vorliegt. In diesem Bereich verfestigt der Werkstoff. Beim Überschreiten der Zugfestigkeit  $R_m$  eines Werkstoffs wird die Zugprobe bis zum endgültigen Bruch eingeschnürt.

Beim Verfestigen des Aluminiumwerkstoffs, z. B. in der Trennfuge zwischen Fügeelementen und den Stromschienen in einer Schraubenverbindung, entstehen weitere Versetzungen, die sich durch den Kristall bewegen. Beim Aufstauen der Versetzungen vor Korngrenzen und durch das gegenseitige Behindern wird die Bewegung aufgehalten. Ein weiterer Transport der Versetzungen erfolgt dann nur durch eine zusätzliche mechanische Spannung. Parallel zur Verfestigung des Aluminiums durch die mechanische Beanspruchung kann eine zeit- und temperaturabhängige Entfestigung des Werkstoffs einsetzen (Kapitel 4.2.2). Dadurch verringert sich die mechanische Festigkeit der Werkstoffe, z. B. ab 93 °C bei hartgezogenen Drähten aus Al 99,5(A) [N17], [2]. Ein Indikator für die Veränderung der mechanischen Festigkeit ist die Materialhärte (Kapitel 7.2.1), [6], [57].

#### 4.2.2 Zeit- und temperaturabhängige Werkstoffentfestigung

Bei hohen Betriebstemperaturen erhöht sich die Beweglichkeit von Fremdatomen, Versetzungen und anderen Gitterbaufehlern im Werkstoff (Tabelle 2.3). Versetzungen bewegen sich dabei mit einer höheren Geschwindigkeit durch die Kristalle und ordnen sich energetisch günstig neu an [1]. Insbesondere bei kaltverfestigten Aluminiumwerkstoffen ist durch die hohe Versetzungsdichte, im Vergleich zu weichgeglühtem Aluminium, das Gleiten von Versetzungen signifikant. Das Al 99,5(A) im Zustand H14 (Tabelle 2.2, Tabelle 6.2) ist auf

die halbe Maximalhärte kaltverfestigt. Durch das Umordnen der Versetzungen verringern sich die Festigkeit und die Härte des Werkstoffs geringfügig, obwohl die Fehlerdichte nicht signifikant reduziert wird [1], [58]. Dieser physikalische Mechanismus wird als Erholung bezeichnet und ist etwa ab einer homologen Temperatur von  $T/T_s = 0,5$  vollständig thermisch aktiviert (Tabelle 4.3), [56].

Tabelle 4.3: Physikalische Mechanismen der Werkstoffentfestigung [6], [11], [56]

Mechanismus	Thermische Aktivierung Homologe Temperatur $T/T_s$	Elementarprozesse im Gefüge
Statische Erholung	$> 0,5$	Umlagern von Versetzungen ohne äußere mechanische Spannung
Statische primäre Rekristallisation	$\approx 0,4$	Reine Metalle (Tammansche Regel)
	$> 0,6$	Technische Legierungen
Sekundäre Rekristallisation (Kornvergrößerung)	$> T/T_s$ für primäre Rekristallisation	Wachsen von Körnern durch Auflösen und Anlagern von kleinen Nachbarkörnern
Teilchenvergrößerung (Ostwald-Reifung)	$> 0,4$	Wachsen von Teilchen (Ausscheidungen) durch Auflösen und Anlagern kleinerer Partikel (Diffusion)

Die homologe Temperatur ist das Verhältnis aus der betrachteten absoluten Temperatur  $T$  in Kelvin zur absoluten Schmelztemperatur  $T_s$  des Werkstoffs in Kelvin. Für Aluminiumwerkstoffe wird ein Erstarrungsbereich der Schmelze und kein fester Wert für die absolute Schmelztemperatur genannt (Tabelle 2.2), sodass die homologe Temperatur nur näherungsweise berechnet werden kann.

Die Erholung des Gefüges wird in statisch, ohne mechanische Belastung (Tabelle 4.3) und dynamisch, mit mechanischer Belastung (Kapitel 4.2.3, Tabelle 4.4), unterschieden. Durch den Vorgang der Erholung werden Versetzungen im Werkstoff bewegt, aber z. B. die in Umformrichtung gestreckten Körner von sehr stark kaltverfestigtem Aluminium dadurch nicht verändert (Bild 4.2 b)).

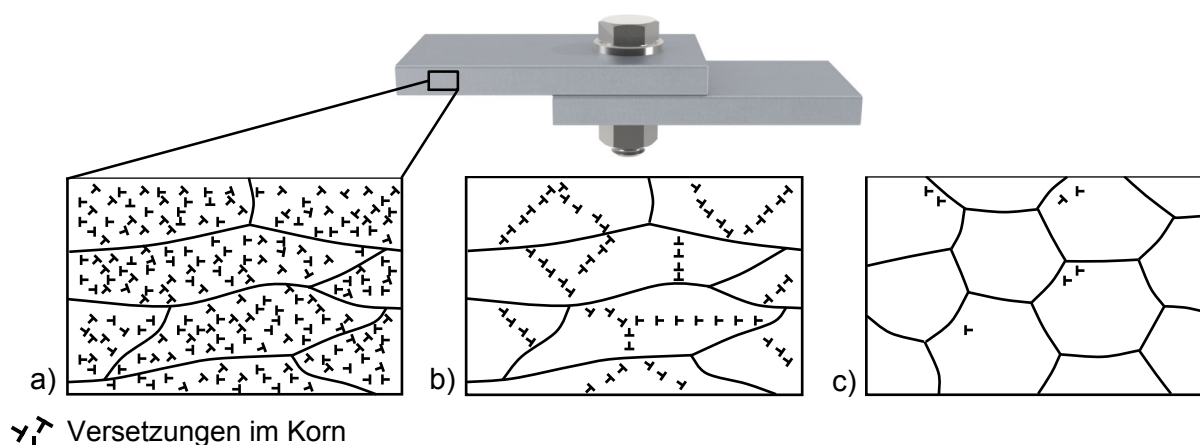


Bild 4.2: Änderung der Mikrostruktur in einer Stromschiene aus Aluminium a) durch Kaltumformen gestreckte Körner mit hoher Versetzungsdichte, b) erholte Mikrostruktur durch Versetzungsbewegung, c) rekristallisierte Mikrostruktur mit höherer Anzahl an Körnern (schematisch) nach [8], [56]

Bei Temperaturen über der Rekristallisationsschwelle können sich bei stark kaltumgeformten Werkstoffen mit einer hohen Dichte an Gitterbaufehlern neue Körner bilden, die zu einem energiearmen Zustand führen [1]. Wie bei der Erholung wird auch bei der primären Rekristallisation für den statischen und den dynamisch Fall (Kapitel 4.2.3) unterschieden. Bei dem Vorgang der statischen primären Rekristallisation bilden sich, an den Stellen des am stärksten gestörten Kristallgitters, Keime für neue Körner. Ausgehend von den Kristallkeimen wachsen die Kristalle im gestörten Gitter so lange, bis sich die Körner an den neuen Korngrenzen berühren (Bild 4.2 c)). Die Rekristallisation ist abhängig vom Umformgrad und vorhandenen Fremdatomen. Sie setzt bei reinen Werkstoffen bei niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu Legierungen ein (Tabelle 4.3). Je höher die Kaltumformung desto niedriger ist die Rekristallisationsschwelle und desto mehr neue Kristallisationskeime bilden sich. Mit der primären Rekristallisation entfestigt sich der Werkstoff signifikant. [1]

Da sich die Materialhärte ähnlich verhält wie die mechanische Festigkeit des Werkstoffs, kann das Entfestigen auch mit einer einfachen Materialhärteprüfung nachgewiesen werden. Nach der primären Rekristallisation würde sich bei weiterer Erwärmung die sekundäre Rekristallisation anschließen. Dabei vergrößern große Körner durch das Auflösen und Anlagern von kleinen Körnern. Bei einer kompletten Rekristallisation wäre der Werkstoff in den weichgeglühten Zustand ohne Verfestigung zurückversetzt.

Bei ausscheidungsgehärteten Aluminiumlegierungen wie z. B. Al MgSi(B) können durch Diffusion ab  $T/T_s > (0,3 \dots 0,4)$  Partikel wachsen. Wird bei dem Vorgang der Vergrößerung eine kritische Partikelgröße der Ausscheidungen überschritten, führt das zu einer Entfestigung. Der Werkstoff überaltert (Kapitel 2.1.3). [1]

#### 4.2.3 Viskoplastische Verformung abhängig von der Temperatur

Bei stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminiumwerkstoffen überlagern sich die zeit- und temperaturabhängigen Mechanismen der Werkstoffentfestigung (Kapitel 4.2.2) mit einem viskoplastischen<sup>4</sup> Anteil. Der viskoplastische Anteil ist zusätzlich von der äußeren mechanischen Spannung abhängig. Folglich beeinflusst auch die Verteilung der mechanischen Spannung in den Trennfugen einer Schraubenverbindung die zeitabhängige plastische Kriechverformung der Stromschienen (Gl. (19), Kapitel 7.1.1).

In der Trennfuge zwischen den festeren Fügeelementen aus Stahl und den Stromschienen liegen in einer Schraubenverbindung die mechanisch am höchsten belasteten Bereiche. In dieser Trennfuge werden auf der Außenkante der Fase der Durchgangsbohrung die höchsten Werte der mechanischen Spannung bestimmt (Bild 7.7, Bild 7.9, Bild 7.13), [8]. In diesem Bereich ist der plastisch verformte Anteil am höchsten und das Verfestigen der Werkstoffe am stärksten. Durch die Verfestigung wird die Versetzungsdichte zunächst erhöht. Dadurch verringert sich zu Beginn der Kriechverformung die Dehnungs- / Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  des Werkstoffs bei konstanter mechanischer Spannung (primärer Bereich der Kriechverformung). Nach diesem Übergangsbereich werden bei erhöhten Temperaturen Erholungsvorgänge im Werkstoff aktiviert (Tabelle 4.4). [11], [56]

<sup>4</sup> Viskoplastische Verformung: Zeitabhängige, plastische Verformung eines Werkstoffs unter Last [11]

Tabelle 4.4: Viskoplastische Verformung der Werkstoffe bei mechanischer Belastung [56]

Mechanismus	Thermische Aktivierung Homologe Temperatur $T/T_s$	Elementarprozesse im Gefüge
Dynamische Erholung (Bedingung: Verformung durch äußere mechanische Spannung)	$> 0,15$	Versetzungsgleiten
	$> 0,2$	Quergleiten von Schraubenversetzungen, Schneiden von Versetzungen
	$> \text{ca. } 0,4$	Klettern von Stufenversetzungen
Dynamische primäre Rekristallisation	$> \text{ca. } 0,4$	Klettern von Stufenversetzungen
Mikroskopisches Kriechen	$> \text{ca. } 0,4$	Abhängig vom thermisch und mechanisch aktivierten Kriechmechanismus (Bild 4.3)

Ist ein Gleichgewicht zwischen dem Entstehen und dem Abbauen von Versetzungen erreicht, ist die Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  niedrig und näherungsweise konstant (sekundäres Kriechen). Für den Bereich des sekundären Kriechens wird die sekundäre Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{II}$  oft mit dem Norton-Bailey-Kriechgesetz beschrieben und für Lebensdauerabschätzungen verwendet (Gl. (24)). [11], [56]

$$\dot{\epsilon}_{II} = C \sigma^n e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (24)$$

$C$  ... Proportionalitätsfaktor aus Langzeitversuchen am spezifischen Modell  
 $n$  ... Spannungsexponent für Norton-Kriechen  
 $Q$  ... Aktivierungsenergie für den Kriechmechanismus  
 $R$  ... universelle Gaskonstante  
 $T$  ... absolute Temperatur

In diesem ist die Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{II}$  über eine Potenzfunktion von der mechanischen Spannung und dem Spannungsexponenten  $n$ , sowie einer exponentiellen Abhängigkeit zur Temperatur  $T$  für einen aktivierten Kriechmechanismus  $Q$  beschrieben. [11], [56]

Die Kriechgeschwindigkeit im sekundären Bereich ist insbesondere von der Mikrostruktur des Werkstoffs beeinflusst. Beim Entfestigen ausscheidungsgehärteter Werkstoffe, z. B. dem Al MgSi(B) (Kapitel 7.2.1), durch Vergrößern der Partikel, nimmt die Kriechgeschwindigkeit nach einem Minimalwert  $\dot{\epsilon}_{II,min}$  stetig zu. In Gl. (24) wird dann meist der Minimalwert  $\dot{\epsilon}_{II,min}$  verwendet. Dieser ist ein Näherungswert. [11]

Im tertiären Kriechstadium erhöht sich die Kriechgeschwindigkeit bei Zugproben durch weitere Schädigungen an den Korngrenzen des Werkstoffs. [11] Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen kann dieses Stadium nicht erreicht werden, weil die mechanische Spannung durch die Kriechverformung der Stromschienen zur Spannungsrelaxation in der Verbindung führt und damit zeitabhängig kleiner wird [8], [37].

Die Schmelztemperatur<sup>5</sup>  $T_s$  von Aluminium (Tabelle 2.2) ist im Vergleich zu anderen Werkstoffen gering. Damit verformen sich die Stromschienen abhängig vom Werkstoff und dem Werkstoffzustand schon bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen langsam aber stetig plastisch durch den physikalischen Vorgang des Kriechens. Da die Kriechgeschwindigkeit durch die Diffusionsgeschwindigkeit im Werkstoff begrenzt wird, kann dieser Vorgang ab einer

<sup>5</sup> Bei Werkstoffen aus Aluminium erstarrt die Schmelze in einem Temperaturbereich (Tabelle 2.2) und nicht bei einem spezifischen Wert  $T_s$



homologen Temperatur von etwa  $T/T_s > 0,3$  einsetzen. [7], [11], [56], [57]

Verschiedene Kriechmechanismen führen zu einer bleibenden Dehnung der Werkstoffe unter Last. Kriechverformung entsteht durch Versetzungskriechen, Diffusionskriechen und Korngrenzengleiten [11], [56]. In Verformungsmechanismen-Diagrammen (Ashby-Map) werden für viele Werkstoffe, wie z. B. einem technisch reinen Aluminium mit einer Korngröße von  $32\text{ }\mu\text{m}$ , die dominierenden Mechanismen dargestellt (Bild 4.3), [7], [11], [57].

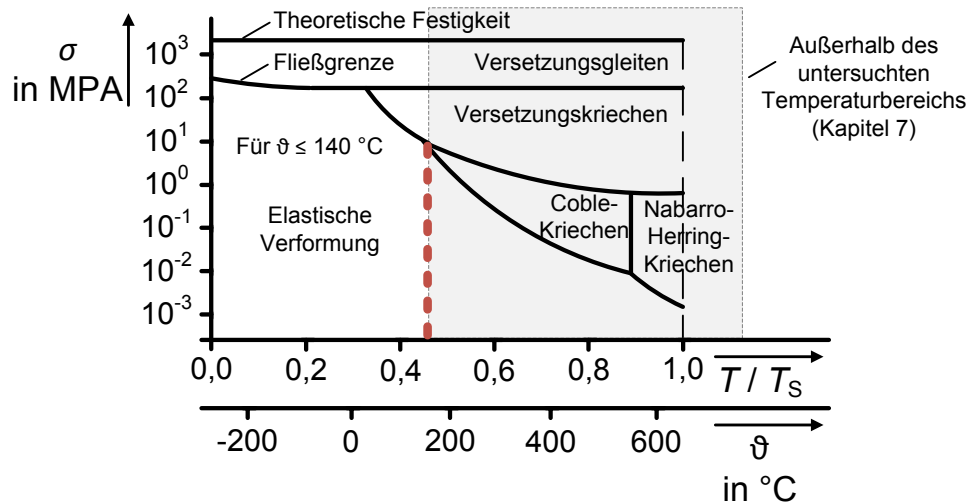


Bild 4.3: Schema eines Verformungsmechanismen-Diagramms für einen Aluminiumwerkstoff mit einer Schmelztemperatur von technisch reinem Aluminium ( $T_s = 947\text{ K}$ ) und einer Korngröße von  $32\text{ }\mu\text{m}$  nach [11], [60]

Die Angaben in diesem Verformungsmechanismen-Diagramm (Bild 4.3) gelten nur als Näherungswerte für die, in dieser Arbeit untersuchten, technisch reinen Aluminiumwerkstoffe (Tabelle 7.9). Bei Aluminiumlegierungen haben die hinzulegierten Fremdatome und die härtenden Partikel einen wesentlichen Einfluss auf die Kriechbeständigkeit des Werkstoffs. Die angegebenen Werte der mechanischen Spannung und der Temperatur zum Aktivieren der Verformungsmechanismen werden damit von den in Bild 4.3 dargestellten abweichen. Weitere Randbedingungen für die dargestellten physikalischen Mechanismen der Verformung sind z. B. die Korngröße und die Verformungsgeschwindigkeit. In Zeitstandversuchen nach [N18] wird an Zugproben für die betrachteten Werkstoffe bei verschiedenen Temperaturen und mechanischen Lasten die Dehnung der Probe bestimmt. Mit den ermittelten Norton-Exponenten und den Aktivierungsenergien aus diesen Versuchen kann der dominierende Kriechmechanismus bestimmt werden. Im Gegensatz zum Zeitstandversuch ist die mechanische Spannungsverteilung in den inneren Trennfugen einer Schraubenverbindung mit Stromschienen inhomogen verteilt (Kapitel 7.1.1). Abhängig von der mechanischen Spannung werden bei konstanter thermischer Beanspruchung, an unterschiedlichen Positionen in den inneren Trennfugen, verschiedene Kriechmechanismen aktiviert.

Die dominierenden Verformungsmechanismen (Bild 4.3) sind in unterschiedlichen Bereichen der mechanischen Spannung  $\sigma$  und der Temperatur  $T$  relevant. Das Versetzungsgleiten oberhalb der Fließgrenze des Werkstoffs definiert das näherungsweise zeitunabhängige plastische Verformen des Werkstoffs der Stromschienen beim Montieren der Schraubenverbindung und dem Setzen unmittelbar danach (Kapitel 4.2.1). Basierend auf der

Erholungstheorie nach Weertmann [59] ist beim Versetzungskriechen ab einer homologen Temperatur von etwa  $T/T_S \approx 0,4$  (Bild 4.3) die dynamische Erholung (Tabelle 4.4) der wesentliche Teilschritt bei der verformungstragenden Versetzungsbewegung. Die dynamische Erholung des Werkstoffs wird durch verschiedene Bewegungsarten von Versetzungen schon bei geringeren Temperaturen als für die statische Erholung thermisch aktiviert (vgl. Tabelle 4.3). Ab einer homologen Temperatur von  $T/T_S > \text{ca. } 0,4$  ist nach [56] der Elementarprozess des Kletterns von Stufenversetzungen (Tabelle 4.4) thermisch aktiviert und führt damit im mechanisch belasteten Werkstoff der Stromschienen zu einer gerichteten Kriechverformung durch den Mechanismus des Versetzungskriechens. Die gerichtete Kriechverformung setzt sich dabei aus schnellen Gleitschritten und langsamen Kletterschritten der Versetzungen zusammen. Die Stufenversetzungen klettern durch das Aussenden und Anlagern von Leerstellen und umgehen diese Hindernisse durch einen Sprung in eine andere Gleitebene. Die Verformungsgeschwindigkeit durch die Versetzungsbewegung ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit des Leerstellentransports. [11]

Der Elementarprozess des Kletterns von Stufenversetzungen ermöglicht das Erholen des Werkstoffs durch Umlagern und gegenseitiges Auslöschen / Annihilieren von Versetzungen. Damit wird die Versetzungsdichte kleiner und mechanische Verzerrungsenergie abgebaut. [11], [56] Unterhalb einer homologen Temperatur von etwa  $T/T_S \approx 0,4$  würden gleitende Versetzungen an Hindernissen, wie z. B. ausgeschiedenen Teilchen im Al MgSi(B), gestoppt und nur durch eine zusätzliche Spannung weiterbewegt. [56]

Das abwechselnde Verfestigen und Erholen des Werkstoffs führt zum zeit- und temperaturabhängigen Abbau der Kontaktkraft in Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus reinem Aluminium [35] und reinem Kupfer [8], [37]. Für stromführende Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus reinem Kupfer wurde die Hierarchie der Prozesse beim Abbau der Kontaktkraft für eine Temperatur von  $\vartheta < 140 \text{ }^\circ\text{C}$  dargestellt (Bild 4.4 a)), [8].

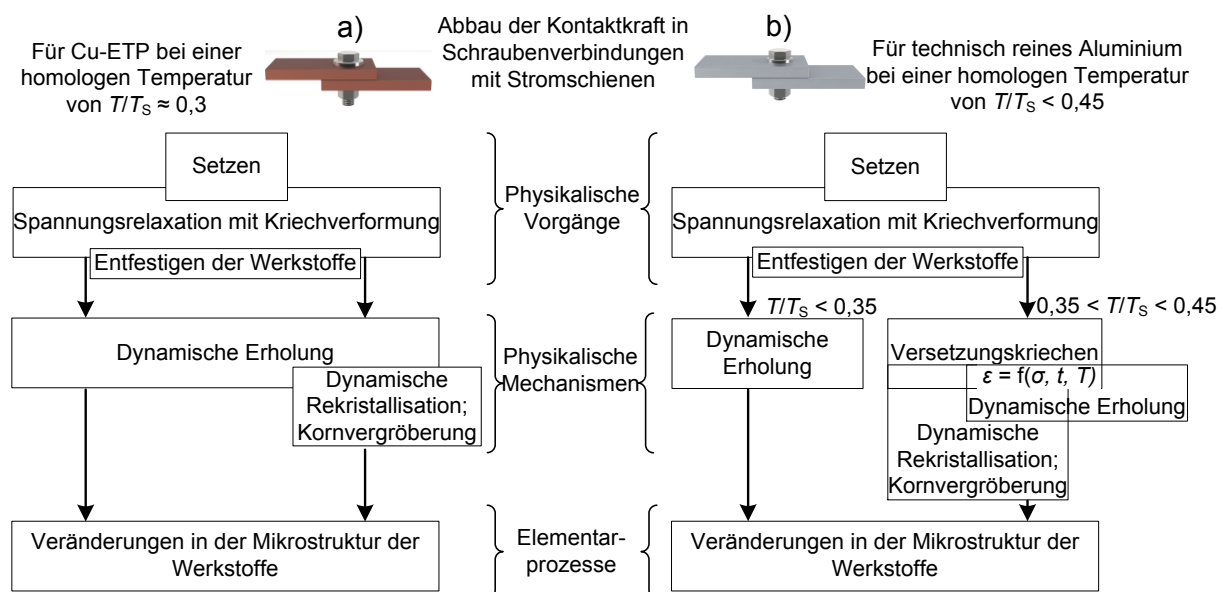


Bild 4.4: Hierarchie der Prozesse beim Abbau der Kontaktkraft in Schraubenverbindungen mit Stromschienen, a) Stromschienen aus reinem Kupfer (Cu-ETP) [8], b) Stromschienen aus technisch reinem Aluminium basierend auf den dargestellten Verformungsmechanismen in (Bild 4.3) nach [11], [60]

Basierend auf dem Verformungsmechanismen-Diagramm (Bild 4.3) wurde für den technisch reinen Aluminiumwerkstoff Al 99,5(A) H14 die Hierarchie der Prozesse bis zu einer homologen Temperatur von  $T/T_S \approx 0,45$  bei einer Temperatur von 140 °C (Tabelle 7.9) gegenübergestellt. Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen baut sich die Kontaktkraft durch Setzen, Spannungsrelaxation mit Kriechverformung der Stromschienen und einer überlagerten Entfestigung der Werkstoffe ab. Es entsteht eine makroskopische und gerichtete Formänderung der Stromschienen. Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Kupfer ist im Temperaturbereich bis 140 °C der physikalische Vorgang des Kriechens nicht thermisch aktiviert. Die viskoplastische<sup>6</sup> Verformung der Stromschienen entsteht hauptsächlich durch den physikalischen Mechanismus der dynamischen Erholung. [8]

Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium können zusätzliche, thermisch und mechanisch aktivierte Kriechmechanismen zu einer gerichteten Formänderung des Werkstoffs führen (Kapitel 4.2.3). Die mechanischen Spannungen nahe des Bohrlochs liegen im Bereich der Fließgrenze des Werkstoffs und führen damit ab einer Temperatur von ca. 100 °C zum Versetzungskriechen. In den Bereichen des Druckkegels der Schraube mit geringeren Werten der mechanischen Spannung wirkt die dynamische Erholung. Mit der Kriechverformung der Stromschienen baut sich die Kontaktkraft  $F_K$  in der Schraubenverbindung ab. Dadurch verkürzt sich die Schraube elastisch im Vergleich zur Montage und die mechanische Spannung wird geringer (Kapitel 4.2, Bild 4.1). Dadurch verfestigt der Werkstoff der Stromschienen weniger durch die geringere mechanische Last. Durch die stetig abnehmende mechanische Spannung wird sich der kriechverformte Anteil abhängig von der Zeit reduzieren und die Kriechgeschwindigkeit verringern. Ein direktes Übertragen der experimentell bestimmten Kriechparameter in Zeitstandversuchen an Zugproben auf das Kraftabbauverhalten in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen ist damit nur näherungsweise möglich.

#### 4.2.4 Berechnen der Kontaktkraft

Für eine Prognose zur Langzeitstabilität der untersuchten, stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen, wird der Abbau der Kontaktkraft im Vergleich zur experimentell ermittelten Mindestkontaktkraft  $F_{K,min}$  (Kapitel 7.2.5) bewertet. Dafür werden die zeitabhängig gemessenen Werte der Kontaktkraft, an den konstant thermisch belasteten Verbindungen, für eine geplante Lebensdauer von 30 Jahren extrapoliert. Die Extrapolation wird mit der Methode nach Larson & Miller für das gesamte System durchgeführt. [8], [11], [56], [62]

Dieses Extrapolationsverfahren wird normalerweise für das Auswerten von Zeitstandversuchen nach [N18], zum Bewerten der Kriechbeständigkeit von Werkstoffen bei einer konstanten mechanischen und thermischen Belastung angewendet. Für den Bereich des sekundären Kriechens, mit der minimalen Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{II,min}$ , stellt die Monkman-Grant-Beziehung einen von der Temperatur unabhängigen Zusammenhang zur Zeitstandlebensdauer dar [61]. Zusammen mit der Arrhenius-Beziehung, für die exponentielle

---

<sup>6</sup> Viskoplastische Verformung: Zeitabhängige, plastische Verformung eines Werkstoffs unter Last [11]

Abhängigkeit der sekundären Kriechgeschwindigkeit von der absoluten Temperatur  $T$ , wird der Larson-Miller-Parameter  $P'$  gebildet (Gl. (25)). [11], [56], [62]

$$P' = T \cdot (C' + \lg t) \quad (25)$$

Die spezifische Materialkonstante  $C'$  hat den Wert  $C' = 20$  für Werkstoffe aus Metall [56]. Die Abschätzung der Kontaktkraft ist für den Bereich des sekundären Kriechens zulässig, wenn sich bei konstanter Belastung und für die gesamte Betriebszeit  $t$  der Werkstoffzustand nicht ändert, sowie keine weiteren physikalischen Mechanismen aktiviert werden. Für die vom Larson-Miller-Parameter  $P'$  abhängige Darstellung der Kontaktkraft wird dann ein linearer Zusammenhang erwartet. Wird im betrachteten Zeitraum ein weiterer physikalischer Mechanismus aktiviert oder der Abbau der Kontaktkraft durch z. B. eine überlagerte Werkstoffentfestigung beschleunigt, ändert sich der Anstieg in der linearen Approximation. Die statistische Unsicherheit bei der Abschätzung der Kontaktkraft erhöht sich beim Extrapolieren auf sehr lange Betriebszeiten und bei zu kurzen Versuchszeiten in den Experimenten.

Ein weiterer Ansatz zum numerischen Berechnen des Abbaus der Kontaktkraft im sekundären Bereich nach dem Norton-Kriechgesetz (Gl. (24)) nutzt die Finite-Elemente-Methode (FEM). Dieser Ansatz wurde bereits in mehreren Arbeiten an Schraubenverbindungen mit Stromschienen und an federnden Kontaktelementen in Steckverbindungen für verschiedene Werkstoffe verwendet [8], [9], [35], [37], [40], [41]. In diesen Modellen wird der Abbau der Kontaktkraft mit phänomenologischen Näherungsgleichungen zum Beschreiben des sekundären Kriechens der Werkstoffe abhängig von der mechanischen Spannung (Norton-Bailey-Kriechgesetz) und der Temperatur (Arrhenius-Gesetz) berechnet. Die Parameter des Berechnungsmodells müssen in Zeitstandversuchen an den Werkstoffen und in Langzeitversuchen an der modellierten Verbindung bestimmt werden. Das primäre Kriechen kann auch mit diesem numerischen Berechnungsansatz nicht ohne zusätzliche Werkstoffuntersuchungen modelliert werden und hat damit keinen Vorteil gegenüber dem Extrapolationsverfahren nach Larson & Miller.

Beim Extrapolationsverfahren werden die Messwerte aus den Langzeitexperimenten ohne weitere Werkstoffuntersuchungen verwendet. Damit ist ein schneller Vergleich zwischen verschiedenen Werkstoffen oder für verschiedene Temperaturen möglich. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Langzeitversuche bei höheren Temperaturen durchzuführen, um die Versuchszeit zu verkürzen und die Ergebnisse für die reale Anwendung auf längere Zeiten zu berechnen. Die Voraussetzung dafür ist aber, dass die physikalischen Mechanismen, die zum Kraftabbau führen, identisch sind und bei hohen Temperaturen nur schneller ablaufen.

#### 4.3 Interdiffusion zwischen unterschiedlichen metallischen Werkstoffen

Abhängig von der Temperatur führt die Diffusion in einem Werkstoff selbst (Selbstdiffusion) und beim Kontakt zwischen zwei unterschiedlichen, ineinander löslichen Metallen (Interdiffusion) zu irreversiblen Platzwechselvorgängen unter anderem von Atomen und Ionen. Dadurch können sich intermetallische Phasen (IMP), z. B. im Kontakt zwischen einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium und einer Stromschiene mit metallischem Überzug aus Silber, bilden (Bild 4.5 a)).

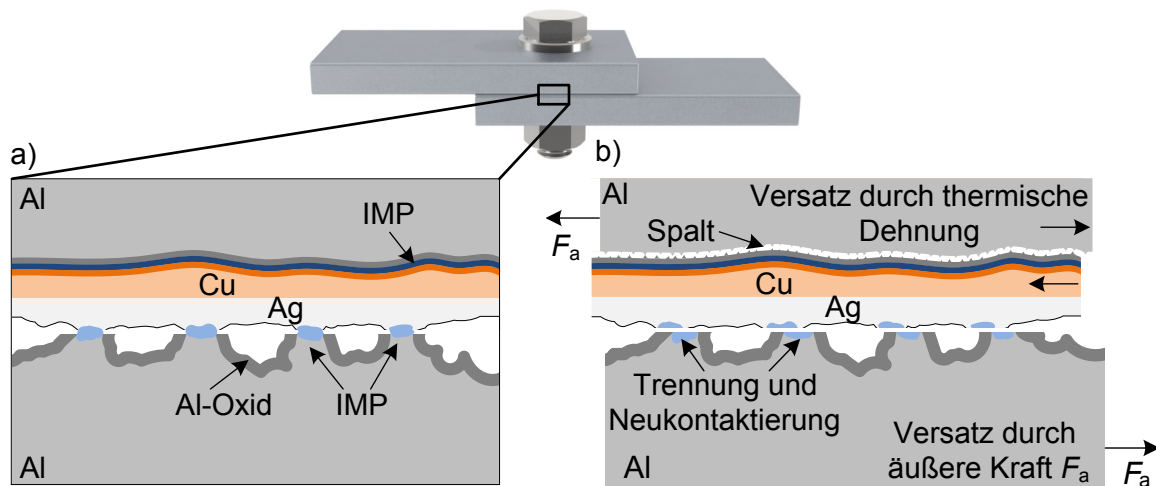


Bild 4.5: a) Intermetallische Phasen (IMP) in den Mikrokontakten zwischen einer unbeschichteten und einer versilberten Stromschiene aus Aluminium mit einer Zwischenschicht aus Kupfer, b) Trennen und Neukontaktieren der Mikrokontakte auf einer Al-Oxid-Fremdschicht durch Versatzbewegung (schematisch) nach [38]

IMP haben oft eine eigene Mikrostruktur, sowie im Allgemeinen eine geringere elektrische Leitfähigkeit als die reinen Werkstoffe und sind mechanisch hart und spröde [3], [8], [37], [38]. Entstehen dicke IMP in den einzelnen, parallelen Strompfaden einer Schraubenverbindung mit Stromschienen (Bild 3.3 b)) kann das den Kontakt- und damit den Verbindungswiderstand erhöhen. Bei Schraubenverbindungen mit metallisch überzogenen Stromschienen aus Aluminium können sich IMP in den stromführenden Mikrokontakten, sowie im stoffschlüssigen, stromführenden Bereich zwischen dem metallischen Überzug und der Stromschiene bilden.

Mechanische Scherspannungen durch eine äußere Kraft  $F_a$  (Bild 4.5 b)) können zwischen den Stromschienen einer Verbindung zu Versatzbewegungen im nm- bis  $\mu\text{m}$ -Bereich führen. Diese axialen Versatzbewegungen können durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe oder von außen, gegen die Verbindung einwirkenden mechanischen Kräften  $F_a$ , auftreten. Dadurch könnten mechanisch spröde IMP in den stromführenden Kontakten, sowie zwischen Grundwerkstoff und dem metallischen Überzug zerbrechen (Bild 4.5 b)). Durch das Trennen der stromführenden Mikrokontakte und auch durch das Neukontaktieren auf fremschichtbehafteten Flächen, z. B. auf einer Aluminiumoxidschicht, würden sich der Kontakt- und Verbindungswiderstand erhöhen. Insbesondere bei metallisch überzogenem Aluminium, mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu den meisten Überzugwerkstoffen, kann sich der metallische Überzug nach dem galvanischen Beschichten ablösen [63], [64].

#### Grundlagen zur Diffusion:

Bei der Interdiffusion zwischen unterschiedlichen Metallen können die Platzwechselvorgänge über die punktförmigen Gitterbaufehler (Tabelle 2.3) durch das Volumen der Kristalle oder über Grenzflächen, z. B. an der Oberfläche und entlang von Korngrenzen erfolgen (Bild 4.6).

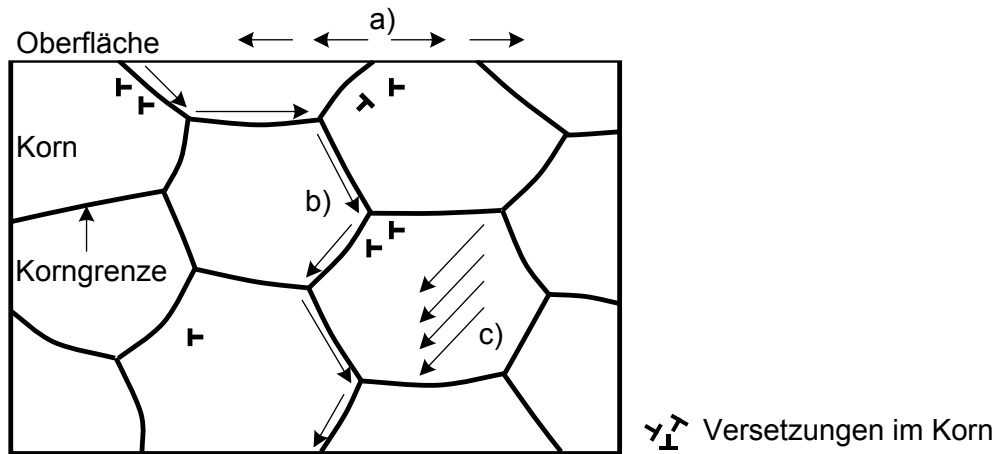


Bild 4.6: Übersicht der Volumen- und Grenzflächendiffusionswege in der Mikrostruktur.  
a) Oberflächendiffusion b) Korngrenzendiffusion c) Volumendiffusion  
(schematisch) nach [38]

Die Platzwechsel werden thermisch aktiviert und führen zum Konzentrationsausgleich im Kontakt zwischen den unterschiedlichen Metallen. Der Diffusionskoeffizient  $D$  gibt dabei die Geschwindigkeit der Platzwechselvorgänge abhängig von der absoluten Temperatur nach einer Arrhenius-Gleichung an (Gl. (26)).

$$D = D_0 \cdot e^{\left(-\frac{Q}{k \cdot T}\right)} \quad (26)$$

$D_0$  ... Frequenzfaktor

$Q$  ... Aktivierungsenergie

$k$  ... Boltzmann-Konstante

$T$  ... absolute Temperatur

Im Vergleich zur Volumendiffusion  $Q_V$  wird für die Bewegung von Atomen entlang von Grenzflächen  $Q_{KG}$  eine geringere Aktivierungsenergie  $Q_{KG} / Q_V \approx (0,5 \dots 0,6)$  benötigt [56]. Abhängig von der Zeit und der Temperatur kann die Dicke von IMP bei bekanntem Wachstumsparameter  $k$  berechnet werden (Gl. (27)). Für IMP im System Al - Cu wurden die Wachstumsparameter zusammengefasst aufgeführt [38].

$$d_{IMP} = \sqrt{k \cdot t} \quad (27)$$

$k$  ... Wachstumsparameter der IMP

$t$  ... Diffusionszeit

Zwischen den Werkstoffpaaren Al - Ni, Al - Cu und Al - Ag können sich IMP bilden (Tabelle 4.5), [65].

Tabelle 4.5: Elektrische Leitfähigkeit und Mikrohärtigkeit von intermetallischen Phasen (IMP) in binären Phasendiagrammen [65] zu den Werkstoffpaarungen Al - Ni, Al - Cu und Al - Ag

System	Bezeichnung der IMP	Elektrische Leitfähigkeit $\kappa$ in $\text{MS m}^{-1}$	Mikrohärtigkeit in HV0,01	Literatur / Bemerkungen
Al - Cu	$\text{Al}_2\text{Cu}$	13,5	632	[38], [68]
	$\text{AlCu}$	32,3	794	[38], [68]
	$\text{Al}_3\text{Cu}_4$	8,2 [66]	624 (HV0,4 N) [67]	Nur schmelzmetallurgisch herstellbare IMP in [68]
	$\text{Al}_2\text{Cu}_3$	7,5 [66]	180 (HV0,4 N) [67]	Nicht alleinstehend mit PVD herstellbare IMP in [68]
	$\text{Al}_4\text{Cu}_9$	3,7	636	[38], [68]
Al - Ag	$\text{Ag}_3\text{Al}$	1,8	437 <sup>7</sup>	[38], [68]
	$\text{Ag}_2\text{Al}$	3,0	291	[38], [68]
Al - Ni	$\text{Al}_3\text{Ni}$	3,0 ... 3,3 (bei 27 °C)	k. A.	[69], [70], [71]
	$\text{Al}_3\text{Ni}_2$	k. A.		
	$\text{AlNi}$	2,5 ... 12,5 (bei 25 °C)		
	$\text{Al}_3\text{Ni}_5$	k. A.		
	$\text{AlNi}_3$	k. A.		

In binären Phasendiagrammen sind die sich bildenden Mischkristalle, Mischungslücken und IMP abhängig von der Temperatur dargestellt [65]. Diese Phasendiagramme wurden an schmelzmetallurgisch hergestellten Proben überwiegend für einen Temperaturbereich über 200 °C bestimmt. Die zugelassenen Grenztemperaturen für Werkstoffe in der Elektrotechnik liegen meist unterhalb dieses Wertes. In [38] wird deutlich, dass sich das Wachstum von IMP in stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Al und Cu von den schmelzmetallurgisch gebildeten IMP im System Al - Cu unterscheidet. Es konnten nicht alle Phasen im System Al - Cu alleinstehend hergestellt werden (Tabelle 4.5) [38].

#### Einfluss von IMP auf den Verbindungswiderstand in den Systemen: Al - Cu und Al - Ag

Es wurden für die IMP in den verschiedenen Systemen geringere Werte der elektrischen Leitfähigkeit und höhere Werte der Mikrohärtigkeit im Vergleich zu den reinen Leiterwerkstoffen bestimmt (Tabelle 4.5). Abhängig von der Dicke der IMP, im stromführenden Bereich zwischen Grundwerkstoff und metallischem Überzug, sowie in den stromdurchflossenen Mikrokontakten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen (Bild 4.5 a)) würden diese den Verbindungswiderstand erhöhen. Das Altern von Schraubenverbindungen mit Stromschienen durch das Bilden von IMP wurde für die Systeme Al - Cu und Al - Ag im Temperaturbereich zwischen 90 °C und 200 °C untersucht [37], [38]. Es wurde in Langzeitversuchen an verschiedenen Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und Kupfer der Verbindungswiderstand abhängig von der Zeit für drei Jahre ermittelt. In mikroskopischen Untersuchungen an gealterten Verbindungen wurden IMP nur flächig zwischen z. B. einer Stromschiene aus Aluminium und einem metallischen Überzug aus Kupfer, aber nicht mit signifikanter Dicke in den stromdurchflossenen Mikrokontakten gefunden. Mit den elektrischen Eigenschaften der separat untersuchten, alleinstehend hergestellten IMP im System Al - Cu und Al - Ag wurde

<sup>7</sup> Restsilbergehalt festgestellt, Härte vermutlich etwas höher [38]

der Verbindungswiderstand berechnet. Im Vergleich zwischen den Modellrechnungen und den Ergebnissen aus den Langzeitversuchen wurde festgestellt, dass die gebildeten IMP in den Systemen Al - Cu und Al - Ag nicht ausschließlich das elektrische Langzeitverhalten der stromführenden Verbindungen bestimmen. Das Erhöhen des Verbindungswiderstands nur durch das Wachsen von IMP wurde ausgeschlossen. Es wird vermutet, dass der Sauerstoff in der umgebenden Luft bei den Langzeitversuchen einen signifikanten Einfluss auf den Verbindungswiderstand hat [37], [38], [75]. Als weiterer Mechanismus beim Altern dieser stromführenden und stromlos im Wärmeschränk gelagerten Schraubenverbindungen wurde die Diffusion des Sauerstoffs in die Mikrokontakte zwischen den Stromschienen mit der Bildung von elektrisch isolierenden Oxidschichten, vorrangig an der Aluminiumoberfläche, beschrieben. [38], [75]

#### 4.3.1 Metallische Überzüge aus Silber

Insbesondere für Verbindungen zwischen Leitern aus Aluminium und versilberten Leitern wurde nachgewiesen, dass der Sauerstoff durch metallische Überzüge aus Silber hindurch diffundieren kann [37], [38], [72], [73], [74], [75], [76]. Dadurch bilden sich Aluminiumoxidschichten auf der Kontaktfläche. Die Affinität des Aluminiums zu Sauerstoff ist so stark, dass die Diffusionswege schnell überwunden werden können. Durch die Aluminiumoxidschicht, mit einem sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstand (Tabelle 4.2), erhöht sich der Kontakt- und damit der Verbindungswiderstand. Oxidschichten auf Aluminium sind transparent [3]. Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Cu-ETP R250 und einem metallischen Überzug aus Silber war der Nachweis einer Oxidschicht möglich. Die versilberten Stromschienen wurden für 8 h bei 530 °C im Wärmeschränk gelagert und danach zu Schraubenverbindungen montiert. Der Verbindungswiderstand hatte sich im Vergleich zu einer Schraubenverbindung mit Stromschienen im Ausgangszustand auf das Zehnfache erhöht. Am metallografischen Querschliff der warmgelagerten Stromschienen konnte eine Kupferoxidschicht zwischen Kupfer und dem metallischen Überzug aus Silber nachgewiesen werden. [72]

Ein metallischer Überzug aus Silber ist außerdem für Kupfer durchlässig. Entlang der Korngrenzen im metallischen Überzug aus Silber diffundieren Kupferatome z. B. aus einer Zwischenschicht oder einer Stromschiene aus Kupfer bis an die Oberfläche des Silberüberzugs (Kapitel 8.5) [42]. Abhängig von der Temperatur und dem umgebenden Medium kann sich dadurch eine Kupferoxidschicht an der Oberfläche bilden (Tabelle 4.2, Kapitel 8.5) [42]. Dadurch kann sich für quasistationäre elektrische Kontakte, z. B. in Steckverbindungen insbesondere mit federnden Kontaktelementen, der Kontaktwiderstand bei Mikrobewegungen erhöhen.

#### 4.3.2 Metallische Überzüge aus Nickel als Zwischen- und Deckschicht

Um die Diffusion von Kupfer in einen metallischen Überzug aus Silber zu verhindern, wird bereits ab einer Temperatur von 140 °C eine Zwischenschicht aus Nickel als Diffusionssperre empfohlen [18]. Elektrolytisch abgeschiedene (galvanische) Nickelüberzüge werden weiterhin als Diffusionssperre in Verbindung mit anderen metallischen Überzügen verwendet [N19]. Bei experimentellen Untersuchungen an einem Aluminium-Basiswerkstoff (Al MgSi1) mit



metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Kupfer und autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P wurde die diffusionssperrende Wirkung für Nickel nachgewiesen. Nach einer Lagerung der beschichteten Proben bei 120 °C im Wärmeschränk wurde nach etwa 170 h Aluminium auf der Oberfläche des Kupfers ermittelt. Das Aluminium ist im metallischen Überzug aus Kupfer, mit Schichtdicken zwischen (10 ... 13) µm, entlang der Korngrenzen an die Oberfläche diffundiert. An Proben mit einer Zwischenschicht aus Ni-P wurde kein Aluminium an der Oberfläche ermittelt. [21]

Nickel wird häufig als Zwischenschicht im metallischen Überzug, z. B. zwischen Silber und Aluminium, abgeschieden. Dadurch wird die Interdiffusion zwischen der Deckschicht und dem Grundwerkstoff verringert [3], [18], [21], [28], [34], [N13], [N20], [N21]. Die schnelle Bildung von IMP, z. B. zwischen Kupferwerkstoffen und einem metallischen Überzug aus Zinn, wird durch eine (5 ... 10) µm dicke Zwischenschicht aus Nickel verhindert [3]. Bei Werkstoffpaarungen zwischen Aluminium und einem Silberüberzug können sich ebenfalls IMP bilden [37], [38]. Für Beschichtungssysteme bei denen ein Silberüberzug auf Kupfer, z. B. einer Zwischenschicht oder dem Basiswerkstoff abgeschieden wurde, gilt eine Grenztemperatur von 150 °C. Für Betriebstemperaturen über 150 °C wird eine Zwischenschicht aus Nickel gefordert. [N13], [N20]

Der Einfluss von axialen Versatzbewegungen in stromführenden Verbindungen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen der Leiter- und verschiedener metallischer Überzüge wurde experimentell untersucht [77]. Bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen können axiale Versatzbewegungen zum Trennen der Mikrokontakte durch Scherung führen. Dadurch und durch das Neukontaktieren auf fremschichtbehafteten Bereichen der mechanisch tragenden Kontaktfläche  $A_t$  erhöht sich der Kontaktwiderstand  $R_k$  (Kapitel 3.1). In [77] wurden Schraubenverbindungen mit einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium und einem Flächenkontakt mit metallischem Überzug aus elektrolytisch abgeschiedenem Nickel Temperaturlastzyklen ausgesetzt. Die Temperaturlastzyklen wurden zwischen Raumtemperatur von etwa 20 °C und einer Temperatur von 70 °C für jeweils 4 h im Wärmeschränk und einer anschließenden zyklischen Strombelastung mit 2 h Einschalt- und Ausschaltphasen durchgeführt. Unabhängig von der Schichtdicke des metallischen Überzugs zwischen etwa (2,5 ... 13) µm wurden konstant niedrige Kontakwiderstände an den Verbindungen bestimmt. Es wurde die Theorie aufgestellt, dass das gute Kontakt- und Langzeitverhalten auf das Formieren von mechanisch festen Mikrokontakten zwischen dem unbeschichteten Aluminium und dem Nickelüberzug zurückzuführen ist [77] (Bild 4.7 a)).

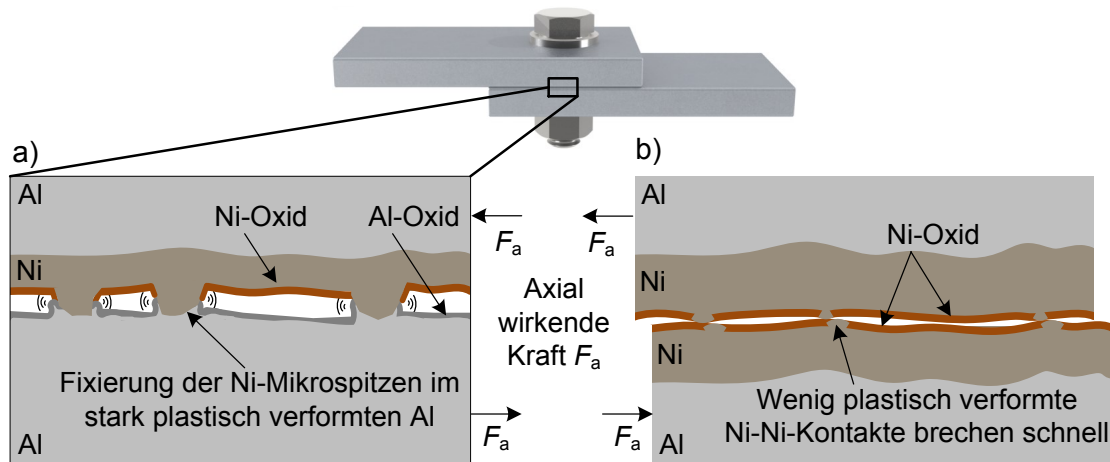


Bild 4.7: Elektrisches Kontaktverhalten im System Al - Ni und Ni - Ni bei axialen Versatzbewegungen durch eine Kraft  $F_a$ . a) Mechanisch festere Ni-Mikrospitzen verformen das weiche Aluminium plastisch und fixieren die stromführenden Kontakte. b) Aufbrechen der überwiegend elastisch verformten Ni-Ni-Kontakte bei axialer Kraft.

Bei einer axial auf die Stromschienen wirkenden Kraft  $F_a$ , die zu einer Versatzbewegung führen könnte, bleiben die mechanisch festen Ni-Mikrokontakte im plastisch verformten Al fixiert. Für den elektrischen Kontakt zwischen zwei Flächenkontakten mit metallischem Überzug aus Nickel wird vermutet, dass sich durch die hohe mechanische Festigkeit und Härte, überwiegend elastisch verformte Mikrokontakte bilden. Bei Versatzbewegungen könnten diese Mikrokontakte leichter getrennt werden und den Kontaktwiderstand in der stromführenden Verbindung erhöhen (Bild 4.7 b)). In dieser Arbeit wurden Schraubenverbindungen mit vernickelten Stromschienen im Dauerlastbetrieb (DL) bei konstanter Temperatur im Wärmeschränk und im Wechsellastbetrieb mit Temperaturlastzyklen (TLZ) untersucht (Kapitel 8.6.2).

## 5 Aufgabenstellung

Eine langzeitstabile, stromführende Verbindung setzt ein gutes elektrisches Kontaktverhalten bei der Montage und eine hohe Zeitstandfestigkeit der Werkstoffe voraus. Für die Anwendung von Aluminium in der Elektrotechnik sind unter wenigen Werkstoffen das Al 99,5(A) und das Al MgSi(B) als Strangpresserzeugnisse standardisiert. Diese Werkstoffe sollen für die Untersuchungen als Referenz dienen.

Das Kontaktverhalten beim Verbinden von zwei elektrischen Leitern über einzelne, stromführende und mikroskopisch kleine Mikrokontakte kann nicht bildgebend dargestellt werden. Insbesondere bei Flächenkontakten ist die Anzahl, Größe und Verteilung der Mikrokontakte unbekannt. Selbst für die vereinfachte Geometrie eines Punktkontaktes, mit einem hohen Anteil wahrer Kontaktfläche  $A_w$  zu scheinbarer Kontaktfläche  $A_s$ , konnten berechnete Werte des Kontaktwiderstands  $R_K$  nicht mit Messergebnissen korreliert werden. Als Ursache wurden pauschal Fremdschichten auf den Kontakten benannt [78]. Für stromführende Schraubenverbindungen mit Stromschienen ist kein Modell aus der Literatur bekannt, mit dem der Kontaktwiderstand abhängig vom tatsächlich stromdurchflossenen Material mit dem elektrischen Widerstand  $R_M$  allgemeingültig berechnet werden kann. In dieser Arbeit wird durch numerische Berechnungen, nach der Finiten-Elemente-Methode (FEM), indirekt eine Korrelation zwischen der inhomogenen mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche und dem elektrischen Kontaktverhalten hergestellt.

Das Langzeitverhalten von stromführenden Schraubenverbindungen ist mit unbeschichteten und metallisch überzogenen Stromschienen aus Aluminium experimentell zu untersuchen. In den Langzeitversuchen sollen für verschiedene Aluminiumwerkstoffe die Kontaktkraft  $F_K$  und der Gütefaktor  $k_u$  abhängig von der Zeit für den Dauerbetrieb bestimmt werden. Mit dem Extrapolationsverfahren nach Larson & Miller ist die Kontaktkraft für jede Kombination aus Leiterwerkstoff, Fügeelementen und Temperatur auf eine Betriebszeit von 30 Jahren zu berechnen. In Kombination mit experimentellen Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und dem Verbindungswiderstand soll das Langzeitverhalten abgeschätzt werden. Eine weitere Zielstellung dieser Untersuchungen ist es die dominanten physikalischen Mechanismen zu bestimmen, die zum Kraftabbau in der Schraubenverbindung führen. Außerdem soll für die verschiedenen Leiterwerkstoffe eine dauerhaft zulässige Grenztemperatur angegeben werden, bei der die Werkstoffe nicht entfestigen.

Das Kontakt- und Langzeitverhalten von stromführenden Verbindungen kann durch metallische Überzüge verbessert werden. Es sind experimentelle Untersuchungen zu den Überzugwerkstoffen Nickel und Silber durchzuführen. Für stationäre, stromführende Schraubenverbindungen sind die dauerhaft zulässigen Grenztemperaturen von 115 °C im Vergleich zu Verbindungen mit unbeschichteten Leitern (90 °C) erhöht. Aus technologischer Sicht sind die metallischen Überzüge in der Norm gleichgesetzt, obwohl die Eigenschaften der Werkstoffe in Bezug auf das Formieren von gut leitfähigen, stromdurchflossenen Mikrokontakten und die Reaktivität in unterschiedlichen Umgebungen sehr unterschiedlich sind. In Langzeitversuchen wird das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten für diese metallischen Überzüge verglichen und abhängig von der Art des Überzugwerkstoffs, der Schichtdicke, der Zwischenschicht und der thermischen Beanspruchung bewertet.

## 6 Untersuchungen zu beschichteten und unbeschichteten elektrischen Flächenkontakten

Als einfache und praxisnahe Modellverbindung eines stromdurchflossenen Flächenkontakts wurden Schraubenverbindungen mit Stromschienen untersucht. Die Stromschienen wurden aus unterschiedlichen Aluminiumknetlegierungen hergestellt (Kapitel 6.1). In Langzeitversuchen an stromführenden Verbindungen mit unbeschichteten Stromschienen wurde das Altern durch den Abbau der Kontaktkraft bei Temperaturen bis 160 °C untersucht und bewertet (Kapitel 7). Bei diesen Versuchen wurden Schraubenverbindungen mit Fügeelementen ohne federnde Eigenschaften (Unterlegscheiben der normalen Reihe - Kapitel 6.2.1) und zusätzlich der Einfluss von federnden Fügeelementen (Spannscheiben - Kapitel 6.2.2) untersucht. Zum Berechnen des elektrischen Kontaktverhaltens in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen wurde zuerst die Verteilung der mechanischen Spannung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  sowohl rechnerisch als auch experimentell bestimmt. Darauf aufbauend wurde in mehreren Schritten ein numerisches Berechnungsmodell zum elektrischen Verhalten erstellt und damit der Zusammenhang zur Mechanik hergestellt (Bild 7.2). Der Einfluss von metallischen Überzügen aus Nickel und Silber auf das Kontakt- und Langzeitverhalten wurde an stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen und an stromlos im Wärmeschränk gelagerten Schraubenverbindungen untersucht. Bei den stromlosen Versuchen kann die Elektromigration als Alterungsmechanismus ausgeschlossen werden. Die Langzeitversuche wurden für verschiedene Schichtdicken, abhängig vom Werkstoff der Zwischenschicht und bei verschiedenen Betriebstemperaturen bis 220 °C durchgeführt (Kapitel 8). Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an unbeschichteten und metallisch überzogenen Stromschienen sind dabei auf andere technische Realisierungen stromführender Verbindungen in elektrotechnischen Anlagen übertragbar, wenn die Randbedingungen beim Betrieb der elektrischen Anlage und die Konstruktion ähnlich sind.

### 6.1 Experimentell ermittelte Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe

Die mechanischen Eigenschaften der Aluminiumlegierungen werden unter anderem durch die hinzulegierten Fremdatome bestimmt. Dies gilt nicht nur für die plastische Verformbarkeit des Werkstoffs im Ausgangszustand bei Raumtemperatur, sondern auch für die Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen durch das Verhindern von Versetzungsbewegungen (Kapitel 4.2). Zum Verhindern von Versetzungsbewegungen durch geeignete Partikel und dispersionshärtende Phasen sind die Anteile an Fremdatomen im Aluminiumwerkstoff entscheidend. Zum Vergleich wurde für die untersuchten Knetlegierungen aus Aluminium die chemische Zusammensetzung mit der Atomemissionsspektrometrie ICP-OES bestimmt (Tabelle 6.1). Im Folgenden werden die Werkstoffe in gekürzter Form mit der standardisierten chemischen Bezeichnung nach [N4] benannt.

Tabelle 6.1: Hauptlegierungselemente in den Aluminiumwerkstoffen (Massenanteil  $w_i$  in %) (Bezeichnung der Werkstoffe nach DIN EN 573-3:2013-12, [N4])

Werkstoffbezeichnung		Werkstoff- zustand [N9]	Massenanteile $w_i$ in %							<b>Rest: Al</b> und weitere Elemente mit einem Massenanteil $\leq 0,01$ %:  Cr, Zn, Ti, Bi, Cd, Ga, Pb, Sn, V,
Chemisch EN AW-	Numerisch EN AW-		Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Ni	Zr	
Al 99,5(A)	1350A	H14	< 0,01	0,06	< 0,01	0,14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Al 99,7	1070	strang- gepresst	< 0,01	0,045	< 0,01	0,09	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Al MgSi	6060	T6	0,41	0,45	0,03	0,2	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Al MgSi(B)	6101B	T6	0,46	0,46	< 0,01	0,11	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Al MgSi(B)	6101B	T7	0,5	0,46	0,03	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Al Mn0,5 Mg0,5	3105	strang- gepresst	0,6	0,48	0,7	0,38	0,15	< 0,01	< 0,01	

Die experimentell bestimmten Massenanteile der verschiedenen Fremdatome entsprechen den normativen Grenzwerten für die unterschiedlichen Legierungen [N4]. Der Werkstoff Al MgSi unterscheidet sich von der Legierung Al MgSi(B) nur geringfügig in den Massenanteilen der unterschiedlichen Fremdatome und hauptsächlich durch die Anforderung an die elektrische Leitfähigkeit. Für das Al MgSi(B) wird entsprechend des Werkstoffzustandes T6 und T7 [N9] ein Mindestwert gefordert [N2], [N8]. Die hier untersuchten Werkstoffe wurden stranggegossen, homogenisierungsgeglüht und stranggepresst (vgl. Kapitel 2.1.2). Im naturharten Al Mn0,5Mg0,5 ist neben dem hohen Anteil an Mn, ein zum Al MgSi(B) vergleichbarer Anteil an Mg und Si enthalten. Der Einfluss des Herstellungsverfahrens mit Strangpressen auf die Eigenschaften des Werkstoffs wurde insbesondere in der Härte (Kapitel 7.2.1) und der elektrischen Leitfähigkeit sichtbar (Kapitel 7.2.2). Im einachsigen Zugversuch wurden die Spannungs-Dehnungs-Diagramme<sup>8</sup> für die Legierungen bei verschiedenen Temperaturen im Anlieferungszustand (Tabelle 6.2) und nach einer thermischen Belastung im Langzeitversuch bestimmt (Tabelle A. 1).

Tabelle 6.2: Mechanische Eigenschaften der experimentell untersuchten Werkstoffe im Anlieferungszustand

Materialbezeichnung [N4] Chemisch EN AW-		Al 99,5(A)	Al 99,7	Al MgSi	Al MgSi(B)	Al MgSi(B)	Al Mn0,5Mg0,5
Materialzustand [N9]		H14	strang- gepresst	T6	T6	T7	strang- gepresst
Zugfestigkeit $R_m$ / Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup> (abhängig von der Temperatur)	20 °C	99 / 95	64 / 29	- / -	237 / 212	202 / 153	179 / 80
	70 °C	- / -	61 / 40	- / -	- / -	- / -	- / -
	115 °C	- / -	- / -	- / -	205 / 189	- / -	- / -
	140 °C	- / -	52 / 47	- / -	192 / 177	165 / 131	169 / 84
Härte in HV10		32	22	79	91	- / -	47
Elastizitätsmodul $E$ in N/mm <sup>2</sup>		- / -	- / -	- / -	- / -	65.000	- / -

<sup>8</sup> Einachsige Zugversuche: (Form B) nach [N19], Firma Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, überwiegend im Rahmen des geförderten Projekts (BMBF): „ALLEE“, Förderkennzeichen: 03EK3538

Die mechanische Festigkeit der Aluminiumwerkstoffe erhöht sich mit zunehmendem Gehalt an Fremdatomen im Vergleich zu den technisch reinen Aluminiumwerkstoffen Al 99,5(A) und Al 99,7. Das Kaltverfestigen des Werkstoffs durch Umformen in den halbharten Zustand H14, z. B. durch Walzen mit einem Kaltwalzgrad von etwa 20 % [4], hat bei Al 99,5(A) zu höheren Werten der mechanischen Festigkeit im Vergleich zum weichen Zustand O nach [N2], [N9] geführt. Durch die Kaltverfestigung erhöht sich auch das Dehngrenzenverhältnis  $R_{p0,2} / R_m$  [1], sodass ein plastisches Verformen durch eine äußere mechanische Last, erst bei höheren mechanischen Spannungen auftritt. Die ausscheidungsgehärteten Werkstoffe mit den Hauptlegierungselementen Mg und Si haben die höchsten Werte der mechanischen Festigkeit und dementsprechend auch für die Werkstoffhärte (Tabelle 6.2, Kapitel 7.2.1). Wird der einachsige Zugversuch an Zugproben bei erhöhten Temperaturen durchgeführt, verändern sich die Werte des Al Mn0,5Mg0,5 insbesondere für die Dehngrenze nur wenig. Das Elastizitätsmodul hat für die meisten Aluminiumwerkstoffe den Wert von etwa  $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$  und ist neben einem Textureinfluss im Werkstoffgefüge in dem Bereich zwischen (20 ... 200) °C wenig von der Temperatur abhängig. In der Literatur wird eine relative Änderung von 10 % zu kleineren Werten bei 200 °C bezogen auf den Wert bei 20 °C genannt. [1], [4]

## 6.2 Geometrie der untersuchten Stromschienen und Fügeelemente der Schraubenverbindungen

Die Stromschienen wurden aus den stranggepressten Rechteckstangen hergestellt (Bild 6.1). Es wurden Stangen mit einem Querschnitt von 50 mm x 10 mm (Bild 6.1 b)) (Kapitel 7) und 40 mm x 10 mm (Kapitel 7 und Kapitel 8) verwendet. Bei den Langzeitversuchen an stromführenden Schraubenverbindungen im Hochstromkreis wurden Stromschienen mit zwei Bohrlöchern im Vergleich zu den stromlos im Wärmeschränk gelagerten Schraubenverbindungen mit je einem Bohrloch untersucht (Bild 6.1), (Tabelle 6.3).

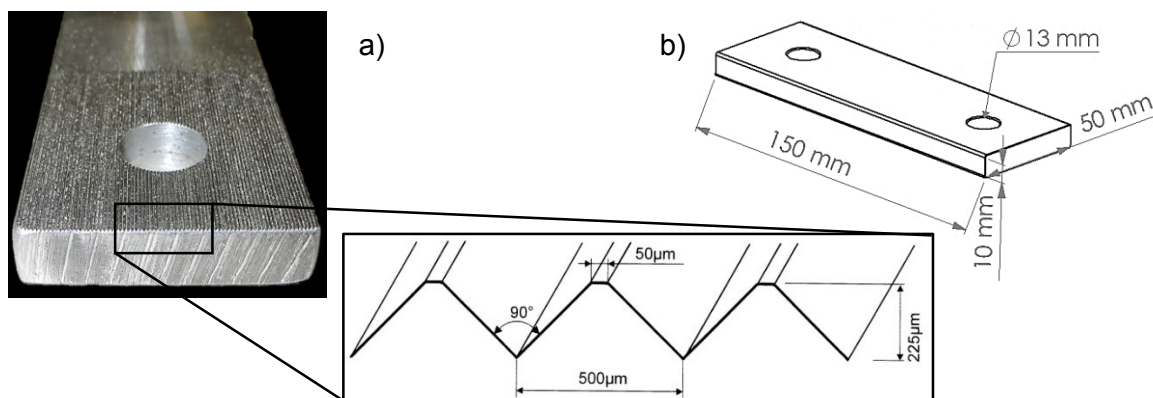


Bild 6.1: Stromschienen für die Langzeitversuche a) Stromschiene mit gerillter, spanabhebend bearbeiteter Kontaktfläche. b) Beispiel einer Stromschiene für die stromführenden Verbindungen im Hochstromkreis (Tabelle 6.3).

Für gezielte mikroskopische Untersuchungen in der Kontaktebene zwischen zwei verschraubten Stromschienen wurden die Kontaktflächen einiger Stromschienen gerillt (Bild 6.1). Die Rillen wurden in die Oberfläche gefräst. Durch das Verbinden einer längs- und einer quergerillten Stromschiene wurden bewusst Kreuzungspunkte hergestellt. Im

metallografischen Schliff wurden diese Kontaktpunkte dann gezielt untersucht.

Tabelle 6.3: Untersuchte Geometrie der Stromschienen und Fügeelemente

Dimensionierung / Spezifikationen der untersuchten Schraubenverbindungen mit Stromschienen			Stromführende Verbindungen im Hochstromkreis	Stromlos, im Wärmeschränk gelagerte Verbindungen
Strom-Schienen	Querschnitt		(50 x 10) mm - (Kapitel 7) (40 x 10) mm - (Kapitel 7 und Kapitel 8)	
	Länge		150 mm	100 mm
	Bohrungen		2 x Ø 13 mm	1 x Ø 13 mm
Füge-elemente	Sechskant-schraube	Kraftmess-einrichtung (Kapitel 6.4)	M12 x 55, STAHL - 8.8 [N22], reduziert auf M10, galvanisch verzinkt	
		Standard	M12 x 45, STAHL - 8.8, galvanisch verzinkt [N22]	
	Sechskantmutter		M12 STAHL 8, galvanisch verzinkt [N23]	
	Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (Kapitel 6.2.1)		2 x kleine Unterlegscheibe Stahl, galvanisch verzinkt [N24]	
	Schraubenverbindung mit federnden Fügeelementen (Kapitel 6.2.2)		2 x Unterlegscheibe mit großem Außendurchmesser Stahl, galvanisch verzinkt [N25]; 2 x Spannscheibe Federstahl, mechanisch verzinkt [N26]	

### 6.2.1 Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF)

In den Experimenten wurden Schraube-Mutter-Verbindungen mit Unterlegscheiben der normalen Reihe [N24] aufgebaut. Beim Verschrauben der Stromschienen wird, die durch Schraube und Mutter eingeprägte Kraft, über die zwei Unterlegscheiben flächig um das Bohrloch herum verteilt (Bild 6.2).

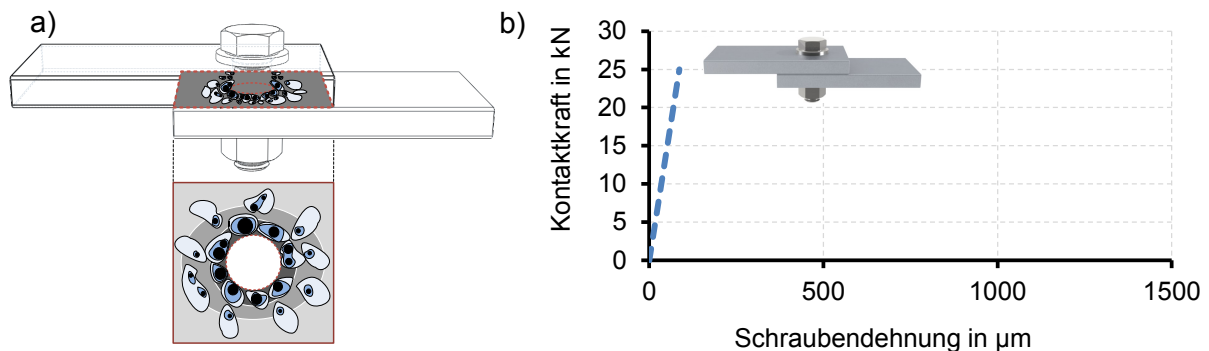


Bild 6.2: Schraubenverbindungen mit Stromschienen ohne federnde Fügeelemente (OFF).  
a) Mechanische Spannungsverteilung zwischen den Stromschienen,  
b) Zusammenhang zwischen der Dehnung der Schraube und der Kontaktkraft (schematisch)

Damit wird die mechanische Spannungsverteilung vergleichmäßigt und lokale mechanische Spannungsüberhöhungen reduziert. Es wird nur durch die elastische Dehnung der Schraube aus Stahl eine federnde Wirkung beim Verspannen erzielt.

### 6.2.2 Schraubenverbindung mit federnden Fügeelementen (MFF) [79]

Mit Spannscheiben [N26] aus Federstahl wird bei Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (Bild 6.3) ein Lockern der Schraube-Mutter-Verbindung durch die mitverspannten federnden Sicherungselemente reduziert.

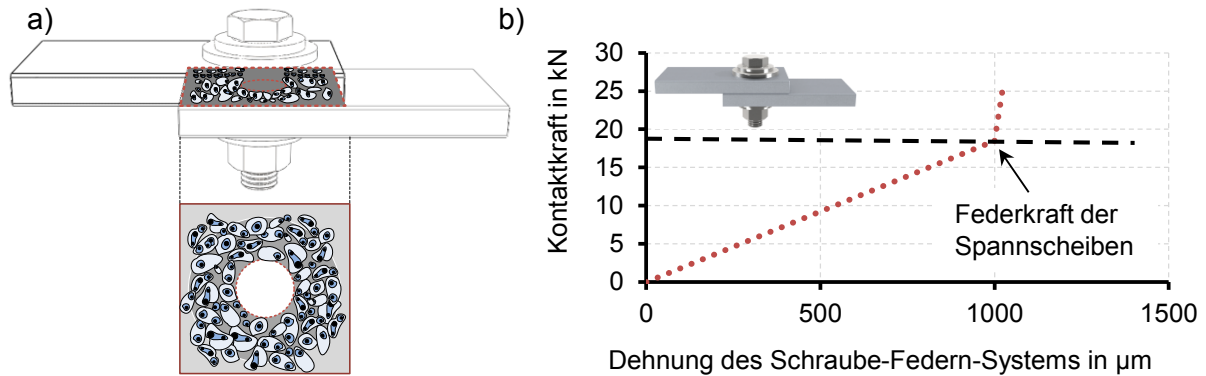


Bild 6.3: Schraubenverbindungen mit Stromschiene und federnden Fügeelementen (MFF).  
a) Mechanische Spannungsverteilung zwischen den Stromschiene,  
b) Zusammenhang zwischen der Dehnung des Schrauben-Federn-Systems und der Kontaktkraft

Der Kraftabbau durch das Setzen und Relaxieren der verbundenen Werkstoffe wird durch das Erhöhen des Federweges verringert. Langzeitexperimente an Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Kupfer zeigten einen deutlich reduzierten Kraftabbau in der Verbindung [3], [8]. Das dort beschriebene Eingraben der Spannscheibenränder in die Oberfläche der Stromschiene wurde bei diesen Untersuchungen an Stromschiene aus Aluminium durch zwei zusätzliche Unterlegscheiben (flache Scheiben der großen Reihe [N25]) verhindert. Auf der Oberfläche der Unterlegscheiben können die Spannscheiben gleiten und es wird die freie Dehnlänge der Schraube erhöht.

Für langzeitstabile Verbindungen werden konstante Federeigenschaften der Spannscheiben auch für hohe Betriebstemperaturen und lange Betriebszeiten vorausgesetzt. Um ein Altern der Spannscheiben und Verringern der Federeigenschaften bei thermischer Beanspruchung auszuschließen, wurde bereits nach [N27] in [8] die Restfederkraft an mehreren federnden Fügeelementen nach einer Belastung mit 25 kN bestimmt. Für diese Art der Spannscheiben aus Federstahl wurde nach einer Warmlagerung für 1.000 h bei 160 °C eine Restfederkraft von  $F_s = 18 \text{ kN}$  experimentell bestimmt. Die Federeigenschaften unterschieden sich nicht signifikant zum Neuzustand mit  $F_s = 18,5 \text{ kN}$ .



### 6.3 Vorbehandlung, Montage und Inbetriebnahme der Langzeitversuche

Vor dem Verschrauben der Stromschienen wurden die zu kontaktierenden Flächen abhängig vom Werkstoff vorbehandelt (Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4: Werkstoffabhängige Vorbehandlung der Kontaktflächen vor der Montage [54]

Kontakt-Material	Vorbehandlungsschritte		
	Entfetten mit fusselfreiem Tuch und Ethanol	Abrasive Vorbehandlung	Rückstände entfernen mit fusselfreiem Tuch und Ethanol
Aluminium	✓	Stahldrahtbürste, 10 gerichtete Bürstenstriche	-
Nickel	✓	Mit Schleifvlies (Scotch-Brite™ MX-SR UFN, 3M)	✓
Silber	✓	-	-

Die Montage der Schraubenverbindungen für die stromlosen Versuche im Wärmeschrank und für den Aufbau in den stromführenden Langzeitversuchen erfolgte gleich (Bild 6.4).

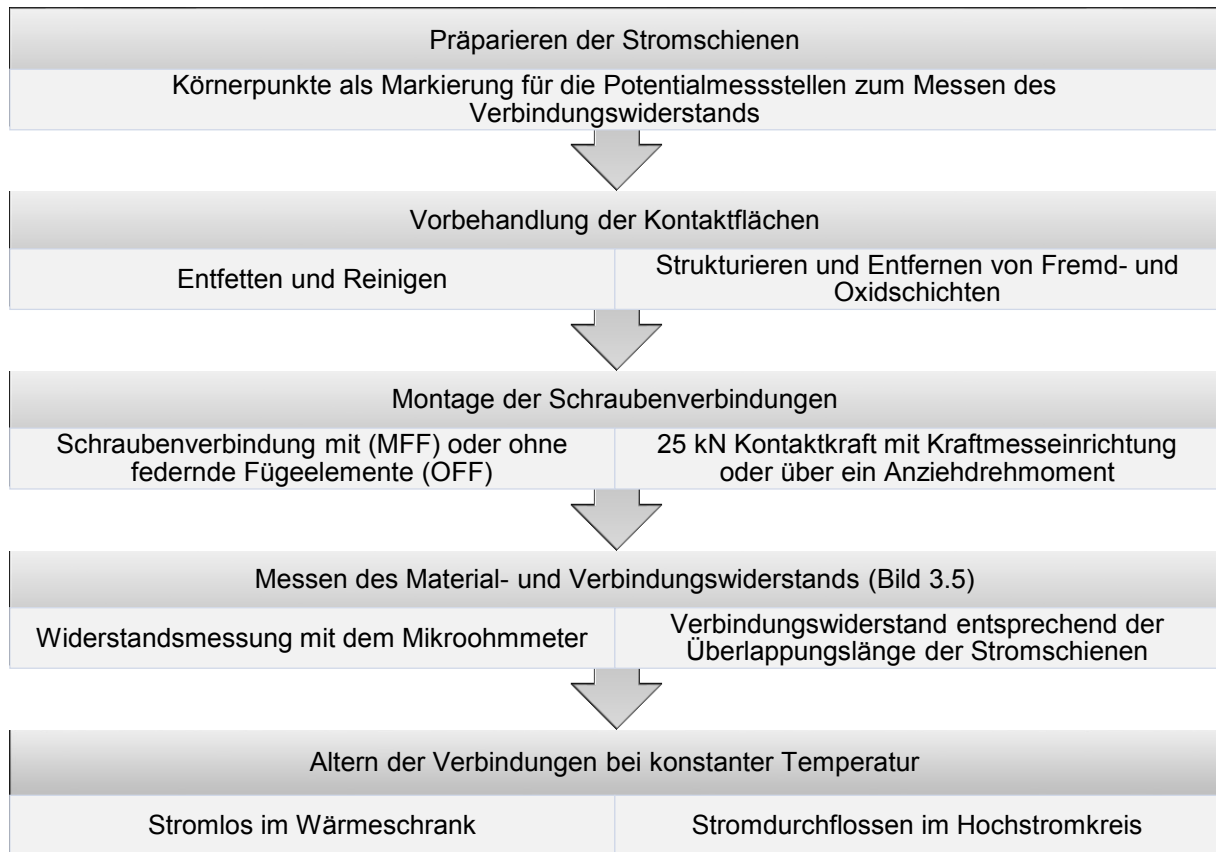


Bild 6.4: Prinzipielle Vorgehensweise beim Aufbau und dem Durchführen der Versuche

Die Kontaktflächen wurden mit Ethanol entfettet, sowie Fremd- und Oxidschichten durch eine werkstoffabhängige, abrasive Vorbehandlung aufgebrochen und entfernt. Durch das gerichtete Bürsten der Kontaktflächen wurde die Oberfläche strukturiert und dadurch die Oberflächenrauheit erhöht. Dadurch formieren sich Mikrokontakte bevorzugt an den Berührungspunkten der Mikrospitzen.

Kontaktflächen mit metallischen Überzügen aus Silber wurden mit Ethanol entfettet und gereinigt [8], [37], [54]. Da Fremdschichten auf Silberkontakten, wie z. B. dünne Sulfidschichten, sehr weich sind, werden sie bei den hohen Flächenpressungen in der Schraubenverbindung aufgebrochen und beeinflussen den Kontaktwiderstand vernachlässigbar gering (Kapitel 4.1) [3], [18], [33].

Voruntersuchungen an Schraubenverbindungen mit vernickelten Stromschienen haben gezeigt, dass Nickeloberflächen vor der Montage abrasiv vorbehandelt werden müssen, um geringe Anfangswerte des Gütefaktors zu erreichen [54]. Die dünne, dichte und harte Nickel(II)-Oxidschicht (NiO) bildet sich schon bei normaler Umgebungstemperatur in kurzer Zeit (Kapitel 2.2) und muss vor dem Fügen der Verbindungen entfernt werden. In den Voruntersuchungen an je einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al MgSi und zwei unterschiedlichen metallischen Überzügen aus Nickel wurde eine abrasive Vorbehandlung mit einem Schleifvlies<sup>9</sup> und die nicht abrasive Vorbehandlung mit Ethanol verglichen. Die Gütefaktoren von Verbindungen mit abrasiv vorbehandelten Nickeloberflächen hatten nach dem Fügen sehr gute Werte von  $k_u \leq 1,0$ . Verbindungen, die nur mit Ethanol gereinigt wurden, hatten Werte zwischen  $2,0 \leq k_u \leq 3,0$ . Bei diesen Gütefaktoren würde die Verbindung bei einer Strombelastung eine Heistelle im Vergleich zu den homogen durchströmten Leitern sein (Kapitel 3.2). Ein beschleunigtes Altern der Verbindungen wäre die Folge. Verbindungen mit Stromschienen und einem Überzug aus Ni-P (Typ 5) (Kapitel 2.2.2) hatten, wegen der niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit des Überzugwerkstoffs, höhere Anfangswerte des Gütefaktors im Vergleich zu elektrolytisch abgeschiedenen Nickelschichten Ni (Kapitel 2.2.1). Beim Lagern der Verbindungen im Wärmeschrank bei 140 °C waren die Gütefaktoren der Verbindungen mit abrasiv vorbehandelten Kontaktflächen annähernd konstant. Im Gegensatz dazu erhöhten sich die Gütefaktoren der Verbindungen, bei denen die Kontaktflächen ausschließlich mit Ethanol gereinigt wurden. Basierend auf diesen Voruntersuchungen wurden beim Montieren der Schraubenverbindungen für die Langzeitversuche die Kontaktflächen aller vernickelten Stromschienen vor dem Fügen immer abrasiv vorbehandelt.

---

<sup>9</sup> Schleifvlies: Typ MX-SR UFN, 3M Scotch-Brite™

Im Hochstromkreis wurden die Schraubenverbindungen in Reihe geschaltet und im Betrieb kurzgeschlossen. Der Kreis mit den Prüflingen wurde als Sekundärwicklung an einen Hochstromtransformator<sup>10</sup> angeschlossen (Bild 6.5). Die Primärwicklung des Hochstromtransformators wurde mit einem Stelltransformator<sup>11</sup> verbunden. Mit dem Stelltransformator wurde die Einspeisung des Hochstromtransformators hergestellt und damit die in der Sekundärwicklung induzierte Spannung, sowie die Höhe des Stromes im Prüfkreis eingestellt. Die Temperatur an den Verbindungen wurde regelmäßig in kurzen Zeitabständen mit einem Handtemperaturmessgerät<sup>12</sup> an der Oberfläche gemessen und gegebenenfalls der Strom nachgestellt.

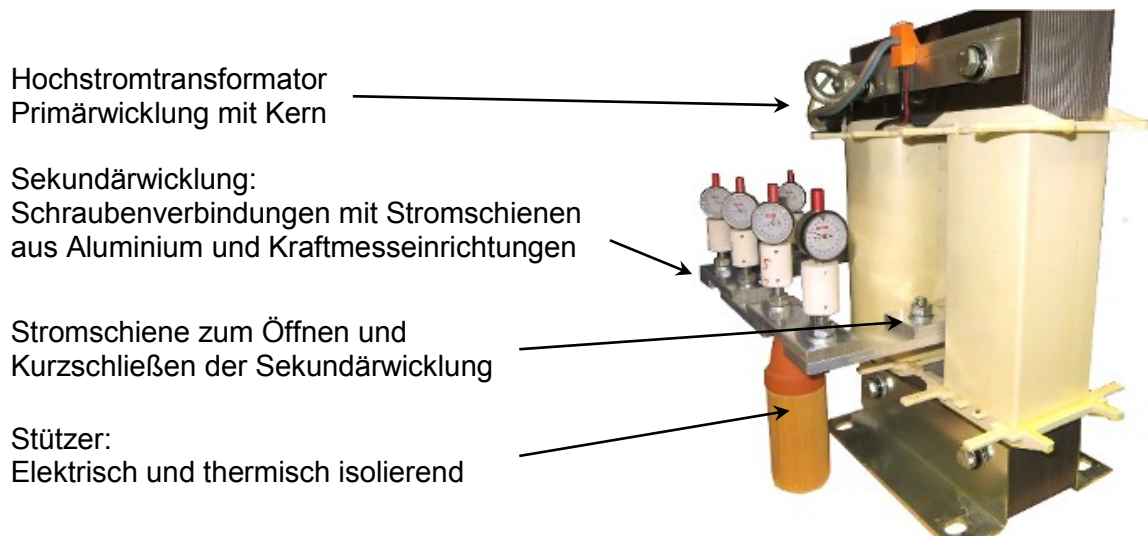


Bild 6.5: Langzeitversuch im Hochstromkreis zum Untersuchen stromführender Schraubenverbindungen mit Stromschienen

Die Schraubenverbindungen wurden stromführend oder stromlos entsprechend der zulässigen Betriebstemperaturen, in den geltenden Normen für stromführende Leiter und Verbindungen elektroenergie technischer Anlagen, gealtert (Tabelle 2.6). Abweichend von den Betriebsbedingungen in der Praxis wurde das Langzeitverhalten der Verbindungen bei einer konstanten Temperatur untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prüfung unter Dauerlast eine höhere Beanspruchung darstellt [2], [38]. Um das Altern der einzelnen Verbindungen zu ermitteln, wurden zeitabhängig die Verbindungswiderstände unbelastet bei Raumtemperatur mit dem Mikroohmmeter<sup>13</sup> gemessen. Der Verbindungswiderstand wurde nach dem Öffnen des Prüfkreises mit der Vier-Leiter-Methode und der Berücksichtigung von Thermospannungen gemessen. Die Kraftmesseinrichtungen wurden zyklisch während der Dauerbeanspruchung im warmen Zustand abgelesen.

<sup>10</sup> Hochstromtransformator: Typ RUE 4500 So, Firma Michael Riedel

<sup>11</sup> Stelltransformator: Typ RRSP 2512, Firma Michael Riedel

<sup>12</sup> Temperaturmessgerät mit Fühler: Typ Almemo, Firma Ahlborn

<sup>13</sup> Mikroohmmeter: Typ LoRe®, Firma Werner Industrielle Elektronik

#### 6.4 Erzeugen und Messen der Kontaktkraft im Langzeitversuch

Die Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  wurde an den untersuchten Schraubenverbindungen entweder definiert über Kraftmesseinrichtungen (Bild 6.6), [8], [35], [36], [37], [40] oder über ein in Vorversuchen ermitteltes Anziehdrehmoment mit einem Drehmomentschlüssel eingestellt.

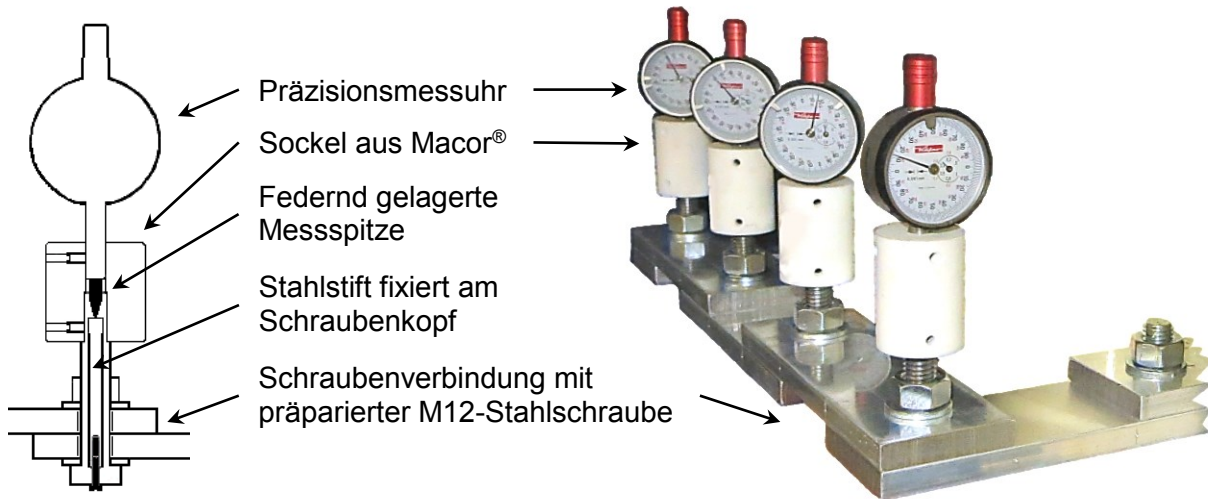


Bild 6.6: Kraftmesseinrichtungen an stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen

Je Kraftmesseinrichtung wurde aus einer M12 – Sechskantschraube [N22] eine Dehnmessschraube mit einem auf M10 reduzierten Querschnitt gefertigt. Mit einer Präzisionsmessuhr erfolgte das Messen der Dehnung des Schraubenschaftes gegenüber dem am Schraubenkopf fixierten Stahlstift. Zum Befestigen der Präzisionsmessuhr wurde ein Sockel aus Macor<sup>®14</sup> auf dem Schraubenschaft angeschraubt. Über die Nachgiebigkeit der verwendeten Fügeelemente wurde die Kontaktkraft abhängig von der Dehnung berechnet [35]. Die Schrauben in den Verbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) wurden bei der Montage um  $\Delta l_{S,OFF} = 70 \mu\text{m}$  und in den Verbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) um  $\Delta l_{S,MFF} = 86 \mu\text{m}$  elastisch gedehnt (Bild 4.1). Die verbliebene Kontaktkraft in der Schraubenverbindung wurde zeitabhängig während der mechanisch-thermischen Beanspruchung in den Langzeitversuchen bestimmt.

Das Anziehdrehmoment  $M_A$  beim Einprägen der Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  in eine Schraubenverbindung mit standardmäßiger M12-Sechskantschraube und Drehmomentschlüssel ist abhängig von der Reibung in den Trennfugen. Insbesondere bei Verbindungen mit federnden Spannscheiben (MFF) verändern sich die tribologischen Eigenschaften der Oberflächen beim Verspannen. Während des Einprägens der Kontaktkraft werden die Spannscheiben über den geblockten Zustand, der bei etwa 18,5 kN erreicht ist [8], auf  $F_K = 25 \text{ kN}$  verspannt. Bis zum geblockten Zustand erhöht sich der Anteil der reibenden Fläche zwischen z. B. der Kopfauflage der Schraube und der Spannscheibe. In Vorversuchen wurde das Anziehdrehmoment  $M_A$  durch das Verschrauben von Stromschienen mit Kraftmess-

<sup>14</sup> Glaskeramik: spanabhebend zu bearbeiten, sowie niedrige elektrische und thermische Leitfähigkeit

einrichtungen und einem Drehmomentschlüssel bestimmt. Es wurde für Schraubenverbindungen (OFF) ein Anziehdrehmoment von  $M_{\text{OFF}} = 80 \text{ Nm}$  und für Schraubenverbindungen (MFF) von  $M_{\text{MFF}} = 130 \text{ Nm}$  ermittelt. Um die Streuung der Kontaktkraft beim Verschrauben mit einem Drehmomentschlüssel zu ermitteln, wurden in einer Materialprüfmaschine<sup>15</sup> 15 Einzelversuche zum Verspannen eines ideal starren Stahlrahmens abhängig von den Fügeelementen durchgeführt (Bild 6.7).

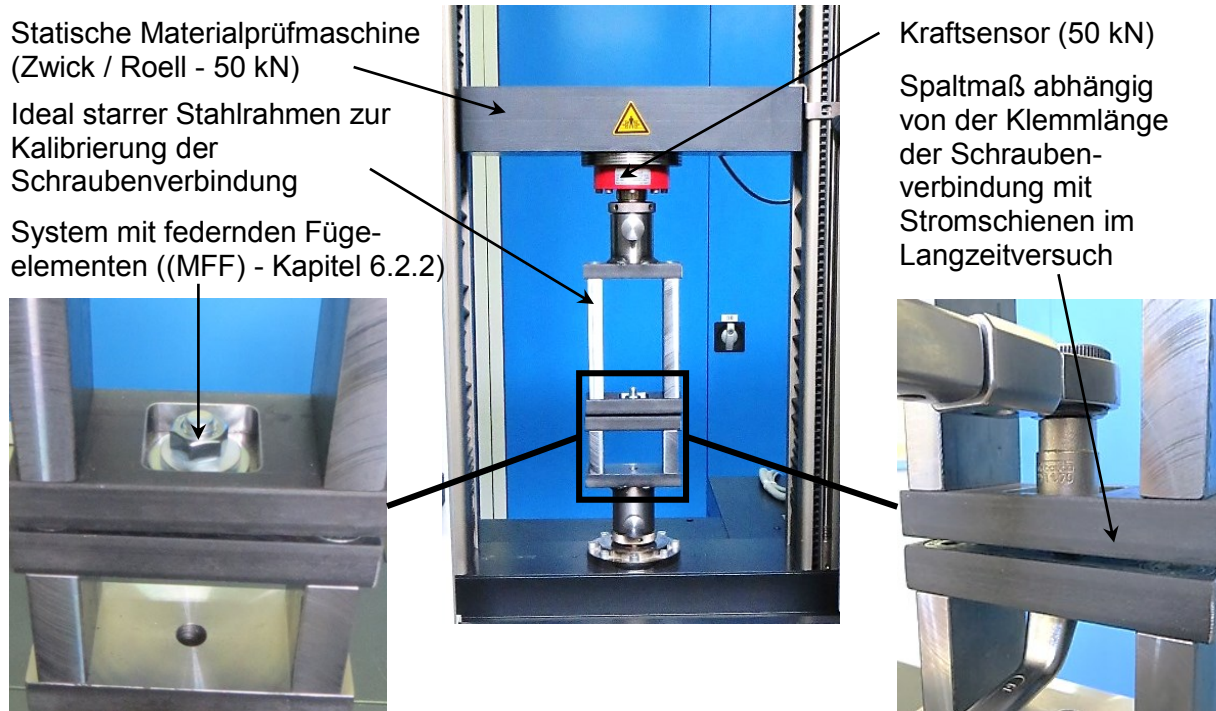


Bild 6.7: Bestimmen der Vorspannkraft von Schraubenverbindungen abhängig vom Anziehdrehmoment  $M_A$  in der Materialprüfmaschine

In [N14] ist für das drehmomentgesteuerte Anziehverfahren mit Drehmomentschlüssel eine Streuung bis zu  $\pm 23 \%$  für die Kontaktkraft angegeben. Bei den hier durchgeführten experimentellen Versuchen wurde eine maximale Streuung bezogen auf den Mittelwert von  $15 \%$  bestimmt (Tabelle A. 2). Die eingestellte Kontaktkraft mit dem Drehmomentschlüssel an Schraubenverbindungen mit Stromschienen in den Langzeitversuchen beträgt für Verbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF)  $F_{\text{K,OFF}} = 24,7^{+3}_{-2,2} \text{ kN}$  und für Verbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF)  $F_{\text{K,MFF}} = 25,7^{+3,8}_{-3,1} \text{ kN}$ .

<sup>15</sup> Statische Materialprüfmaschine: Typ Zwick / Roell – 50 kN, Firma Zwick GmbH & Co. KG



## 7 Elektrisches Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit unbeschichteten Stromschienen

Für eine langzeitstabile, stromführende Schraubenverbindung mit Stromschienen wird abhängig von der Geometrie der Stromschienen ein kleiner Anfangswert des Gütefaktors  $k_{u0}$  [36] nach der Montage vorausgesetzt. Der Zusammenhang zwischen dem Verbindungswiderstand  $R_V$  und der Kontaktkraft  $F_K$  kann experimentell für verschiedene Leiterwerkstoffe und Konstruktionen von Verbindungen bestimmt werden. Damit kann ein minimaler Wert des Gütefaktors  $k_{u,min}$  und die dafür notwendige Kontaktkraft ermittelt werden. Bei diesem Wert  $k_{u,min}$  ist auch der Kontaktwiderstand  $R_K$  durch die elastisch-plastische Verformung von Mikrokontakten und das Aufbrechen von Fremdschichten minimal. Die einzelnen Mikrokontakte in der Verbindung formieren sich abhängig von den Werten und der Verteilung der mechanischen Spannung auf der Kontaktfläche. Die maximalen Werte der mechanischen Spannung werden durch den Wert der eingeprägten Kontaktkraft  $F_K$  und die Verteilung der mechanischen Spannung auf der Kontaktfläche durch die Konstruktion der Verbindung bestimmt. Um für die Dimensionierung der Verbindung eine allgemeingültige Korrelation zwischen der mechanischen Spannungsverteilung in der Verbindung und dem Kontaktwiderstand herzustellen, wurden numerische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

### 7.1 Untersuchungen zum Kontaktverhalten

Um die Verteilung der mechanischen Spannung auf der Kontaktfläche und das elektrische Verhalten in einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF - Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 zu korrelieren, wurden numerische Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt (Bild 7.1, Bild 7.2).

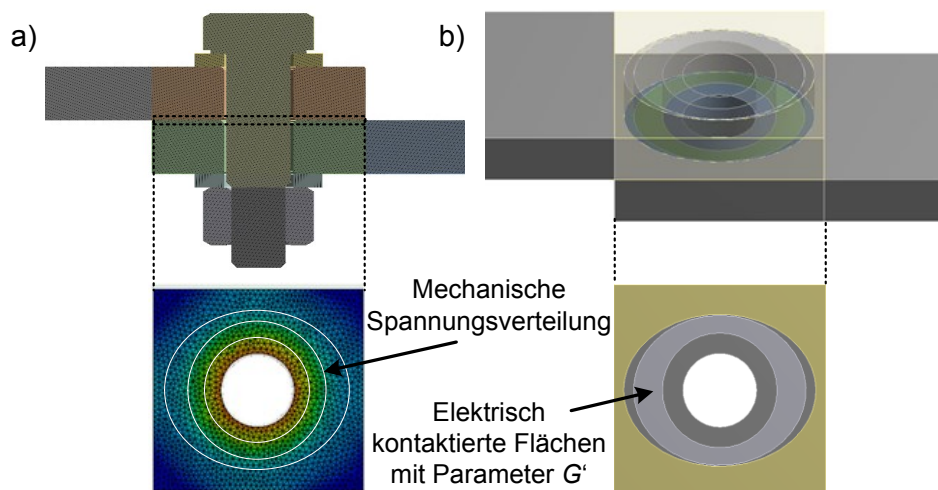


Bild 7.1: Numerische Berechnungen an Schraubenverbindungen mit Stromschienen  
a) Strukturmechanisches Modell, b) Modell zum elektrischen Kontaktverhalten,  
(schematisch)

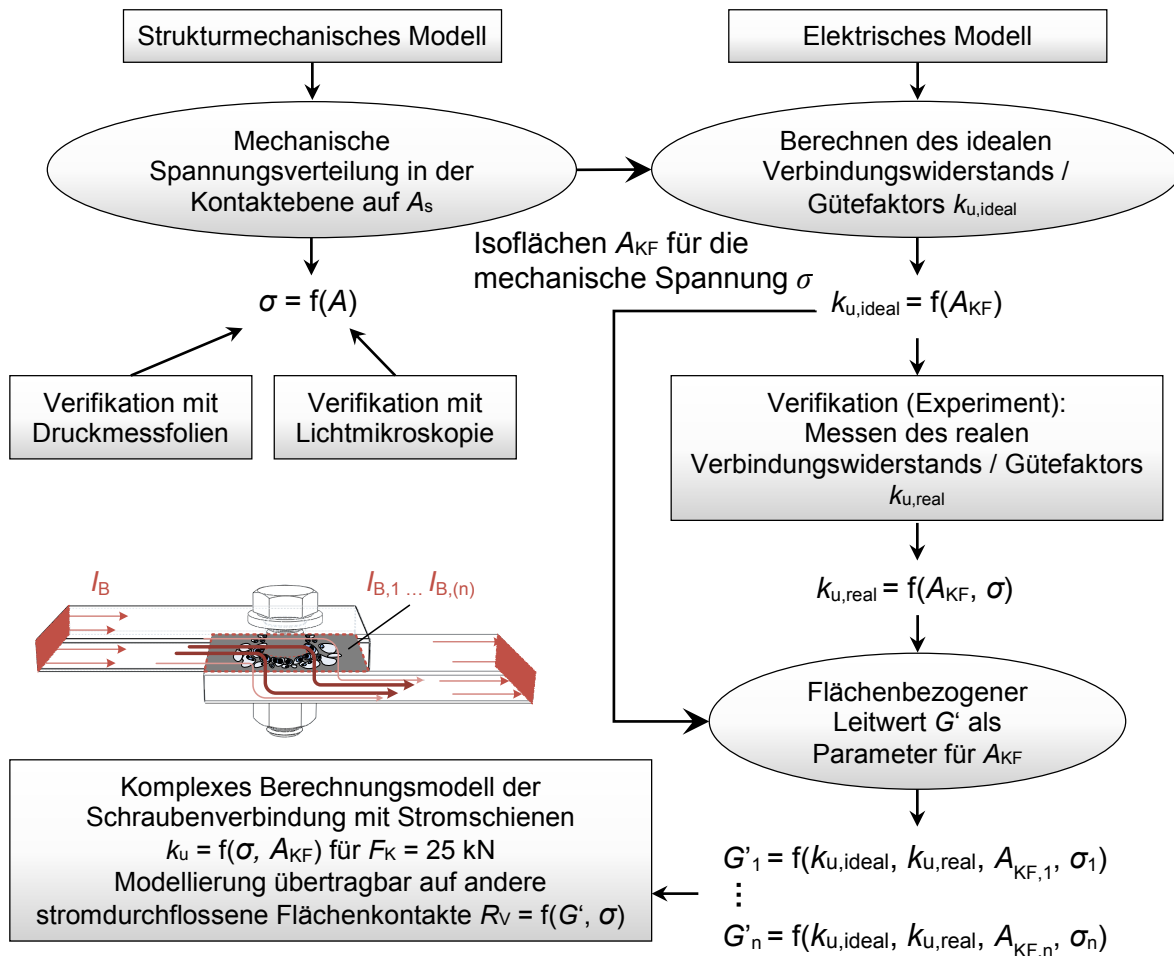


Bild 7.2: Ablaufschema zum Korrelieren des elektrischen Kontaktverhaltens mit der mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen

Für das elektrische Kontaktverhalten ist das Formieren der einzelnen Mikrokontakte abhängig von der lokalen mechanischen Spannung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  entscheidend (Bild 3.1, Bild 3.2, Bild 3.3). An einer Schraubenverbindung (OFF) mit Stromschienen wurde die mechanische Spannungsverteilung für eine Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  numerisch berechnet (Kapitel 7.1.1). Abhängig von der radialen Ausbreitung des mechanischen Druckkegels in der Trennfuge zwischen den Stromschienen und der Werte der mechanischen Spannung wurde ein separates Berechnungsmodell zum elektrischen Kontaktverhalten aufgestellt (Kapitel 7.1.2). In diesem Modell wurden auf der Fläche  $A_s$  unterschiedlich parametrisierte, stromdurchflossene Kontaktflächen  $A_{KF}$  (vgl. Bild 3.3 b)) eingefügt. Der flächenbezogene elektrische Leitwert  $G'$  dieser Kontaktflächen wurde abhängig vom Wert der mittleren mechanischen Spannung variiert (Bild 7.1, Bild 7.2). Durch experimentelle Untersuchungen zum mechanischen und elektrischen Verhalten an einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 wurden diese Berechnungsmodelle mit Messergebnissen verifiziert und teilweise validiert.

### 7.1.1 Mechanisches Berechnungsmodell

Für das Auslegen von Schraubenverbindungen bei Axial- und Querkraftbelastung, sowie Verformungen an Schrauben und verspannten Teilen werden analytische Lösungsansätze angegeben [55], [N14]. Damit wird systematisch ein Mindestwert der Schraubenvorspannkraft entsprechend des Lastfalls und der weiteren Randbedingungen berechnet. Eine der zu berechnenden Größen ist die Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$  in der Trennfuge zwischen den verspannten Teilen, z. B. der Stromschienen (Bild 7.3).

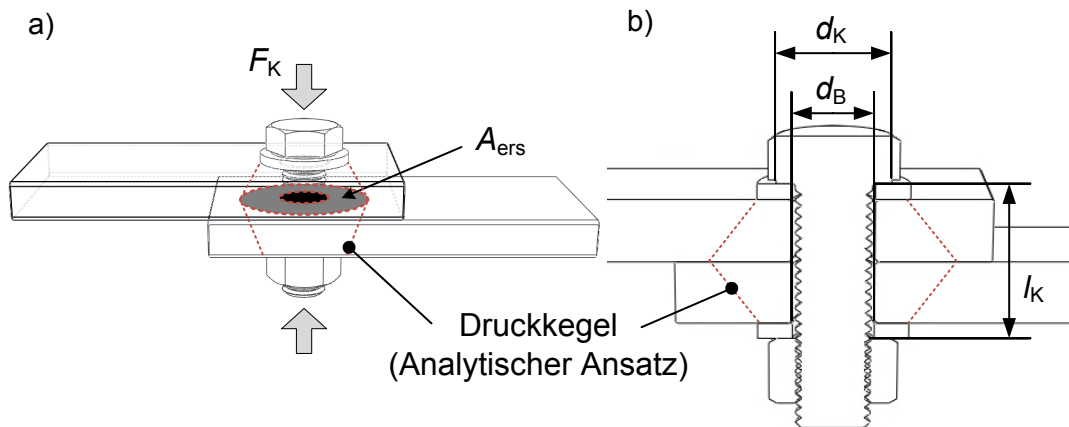


Bild 7.3: Mechanischer Kontakt in der Schraubenverbindung a) Ausbreitung des Druckkegels und analytischer Ansatz zum Berechnen der Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$ , b) Geometrische Größen für die Berechnung von  $A_{\text{ers}}$ .

Die Ersatzquerschnittsfläche entspricht dem analytisch berechneten Flächeninhalt, der sich beim Ausbreiten des Druckkegels in der Schraubenverbindung, durch das Einprägen einer Kontaktkraft in den verspannten Teilen, ausbildet. Der Bohrlochdurchmesser, auf dem keine mechanische Last übertragen wird, ist bei der Berechnung berücksichtigt. Für die Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$  und die ebenfalls analytisch zu berechnende Klemmkraft  $F_K$  ist der Wert der mittleren mechanischen Spannung  $\sigma_{\text{ers}}$  abhängig von den geometrischen Größen der Fügeelemente und der verspannten Teile (Gl. (28), Gl. (29)), [46], [55], [N14].

$$A_{\text{ers}} = f(d_K, d_B, l_K) \quad (28)$$

$d_K$  ... Außendurchmesser der Schraubenkopfauflage

$d_B$  ... Durchmesser der Bohrung

$l_K$  ... Klemmlänge der verspannten Teile inklusive Fügeelemente

$$\sigma_{\text{ers}} = \frac{F_K}{A_{\text{ers}}} \quad (29)$$

$F_K$  ... Klemmkraft zwischen den verspannten Teilen nach einem Kraftabbau durch Setzen (Kapitel 4.2)

Für eine Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) und Stromschienen mit einer Höhe von je 10 mm wurde für den Ersatzquerschnitt ein Flächeninhalt von  $A_{\text{ers}} = 541 \text{ mm}^2$  analytisch berechnet [46]. Das entspricht einer mittleren mechanischen Spannung von  $\sigma_{\text{ers}} = 46,2 \text{ N mm}^{-2}$  bei einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$ . Der berechnete Flächeninhalt des Ersatzquerschnitts  $A_{\text{ers}}$  wurde mit experimentellen Untersuchungen an



Schraubenverbindungen (OFF) mit Stromschienen aus Cu-ETP R300 verglichen. Die untersuchten Schraubenverbindungen wurden in Luftatmosphäre für etwa 5.000 h bei 160 °C thermisch beansprucht. Diese Verbindungen wurden geöffnet und die Stromschienen voneinander getrennt. Durch die thermische Beanspruchung sind auf den Stromschienen aus Kupfer dicke, schwarze Oxidschichten entstanden (Bild 7.4).

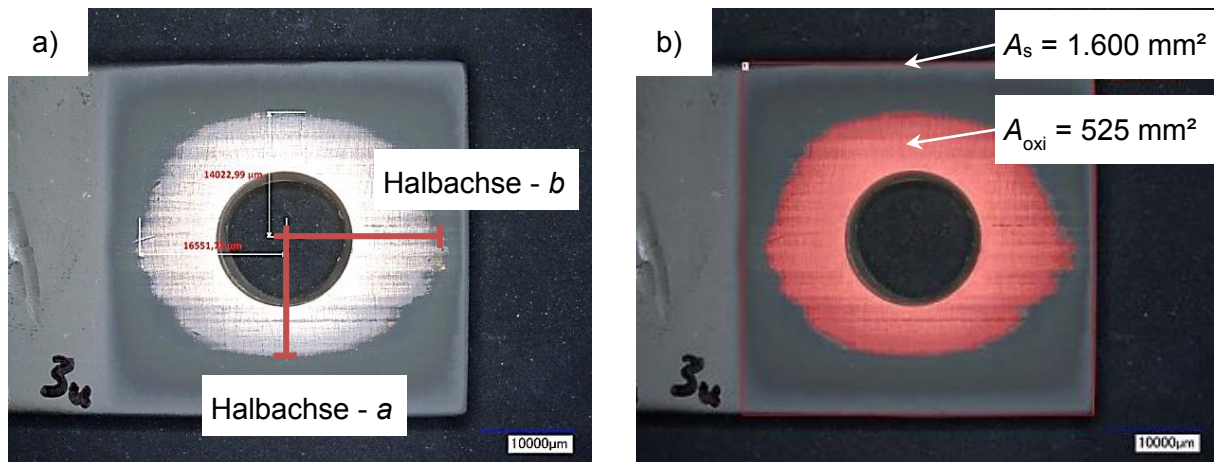


Bild 7.4: Optisch analysierte, oxidierte Kontaktfläche einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Cu-ETP R300 nach einer thermischen Beanspruchung für 5.000 h bei 160 °C und einer Kontaktkraft von 25 kN [46]

Die Färbung des Oxids auf Werkstoffen aus Kupfer ist abhängig von der Dicke der Oxidschicht [8]. Der Sauerstoff ist durch ein geringes Aufklaffen der Stromschienen am Rand der Schraubenverbindung in die Trennfuge zwischen den Stromschienen hineingelangt.

Mit einem Lichtmikroskop wurden die zuvor kontaktierten Flächen optisch analysiert. Es wurde eine maßstäbliche Aufnahme der Kontaktfläche mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm erstellt. Dieses Bild wurde mit einer Software bearbeitet und der Kontrast so gewählt, dass in helle und dunkle Flächenelemente unterschieden werden kann. In Bezug zum Maßstab wurde damit der Flächeninhalt für die helle, schwach oxidierte Fläche  $A_{oxi}$  bestimmt. Diese optische Analyse wurde für Schraubenverbindungen mit verschiedenen federnden und nicht federnden Fügeelementen durchgeführt (Tabelle A. 3). Für eine Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) wurde eine schwach oxidierte Fläche von etwa  $A_{oxi} = 525 \text{ mm}^2$  ermittelt (Bild 7.4), [46]. Der analytisch berechnete Flächeninhalt für den Ersatzquerschnitt  $A_{ers}$  und der Flächeninhalt der schwach oxidierten Fläche  $A_{oxi}$  haben eine relative Abweichung von nur etwa 3 %. Dieser Flächeninhalt entspricht in erster Näherung der mechanisch tragenden Fläche  $A_t$  (Bild 3.1). Für diese Fläche kann mit der Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  eine mittlere mechanische Spannung von  $\sigma_{oxi} = 47,6 \text{ N mm}^{-2}$  angegeben werden. Das Formieren von stromführenden Mikrokontakten ist, im Vergleich zur mechanischen Auslegung von Schraubenverbindungen, aber von der lokalen, inhomogen verteilten mechanischen Spannung abhängig.

Ausgehend vom Bohrlochrand mit den höchsten Werten der mechanischen Spannung verringern sich diese radial nach außen. Für diese inhomogene Verteilung kann keine einfache, geschlossen analytische Lösung gegeben werden. Deswegen wurde die mechanische Spannungsverteilung in den Trennfugen einer Schraubenverbindung mit Strom-

schienen für den Aluminiumwerkstoff Al 99,5(A) H14 (Tabelle 2.2, Tabelle 6.2) numerisch berechnet. Für die numerischen Berechnungen nach der FE-Methode wurde das Programm ANSYS Workbench mit grafischer Benutzeroberfläche verwendet. Im CAD-Modell wurden die normgerechten M12-Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1, Tabelle 6.3) und Stromschienen mit den Abmessungen 40 mm x 10 mm x 100 mm nachgebildet (Tabelle 6.3). Das CAD-Modell wurde mit der Software SolidWorks 2015 erstellt. Der Detailgrad bei der Modellierung der Schraubenverbindung entspricht dem, der Modellklasse III nach [N28]. Die Geometrie wurde im Parasolid-Format in das FEM-Programm ANSYS Workbench 18.2 importiert und mit den Werkstoffdaten parametrisiert (Bild 7.5).

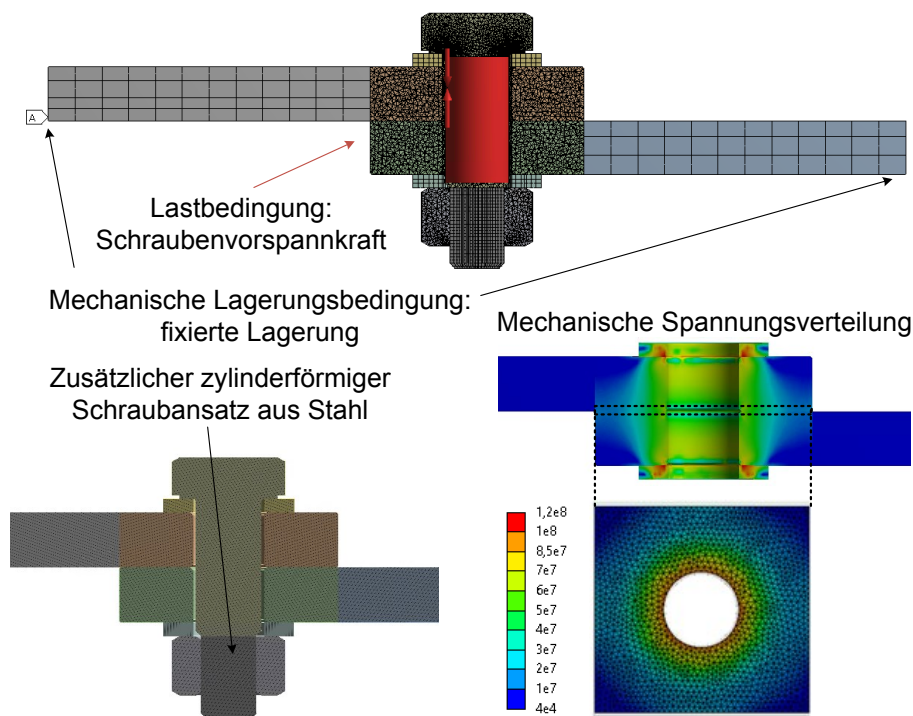


Bild 7.5: Aufbau und Randbedingungen im numerischen Berechnungsmodell zur mechanischen Spannungsverteilung in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen (schematisch)

In den Langzeitversuchen wurden die Schraubenverbindungen mit Stromschienen mit einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  verbunden (Kapitel 6.4). Um die volle Funktionalität beim Einprägen dieser Schraubenvorspannkraft („Bolt Pretension“) in ANSYS zu nutzen, wurde das CAD-Modell angepasst. An den verkürzten Schraubenschaft wurde ein zusätzlicher, zylinderförmiger Ansatz aus demselben Stahlwerkstoff eingefügt. Dieser Ansatz hat als Außendurchmesser den Wert des Innendurchmessers der Mutter und wurde bei der Selektion der Kontaktflächen im ANSYS-Modell als Verbundkontakt ausgeführt. Am Kontakt zum Schraubenschaft wurde ebenfalls ein Verbundkontakt definiert und damit die gesamte Schraubenlänge modelliert. In den Trennfugen zwischen den Fügeelementen und im Kontakt zu den Oberflächen der Stromschienen wurden reibungsbehaftete Kontakte mit den entsprechenden Reibungskoeffizienten definiert (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Werkstoffparameter und Reibungskoeffizienten im FEM-Modell

Werkstoff	Werkstoffeigenschaft	Wert	Bemerkung
Al 99,5(A) H14	Elastizitätsmodul $E$ in $\text{N mm}^{-2}$	69.000	Literaturangabe (Tabelle 2.2)
	Querkontraktionszahl (Poissonsche Zahl) $\nu$	0,33	Berechnet mit Gl. (23) und einem Schubmodul $G = 25.900 \text{ N/mm}^2$ für Al 99,5 [4]
	Zugfestigkeit $R_m$ in $\text{N mm}^{-2}$	99	Multilineare Kurve in ANSYS
	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in $\text{N mm}^{-2}$	95	(Werte aus einem Zugversuch <sup>16</sup> )
	Reibungskoeffizient $\mu$ (Stahl – Aluminium)	0,18	Oberflächenzustand der Reibungspartner Al – unbeschichtet, geschmiegelt; Stahl - poliert [1]
	Reibungskoeffizient $\mu$ (Aluminium – Aluminium)	0,35	Oberflächenzustand der Reibungspartner bearbeitet [1]
Stahl	Elastizitätsmodul $E$ in $\text{N mm}^{-2}$	212.000	Literaturangabe [8]
	Querkontraktionszahl (Poissonsche Zahl) $\nu$	0,3	
	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in $\text{N mm}^{-2}$	876,5	
	Reibungskoeffizient $\mu$ (Stahl – Stahl)	0,2	

Beim Vernetzen des Modells wurden die überlappenden Stromschienenabschnitte und die Fügeelemente in Volumenelemente mit einer Größe von  $500 \mu\text{m}$  gegenüber den freien Stromschienenabschnitten mit einer Elementgröße von  $5 \text{ mm}$  unterteilt (Bild 7.5). Im Bereich der höchsten mechanischen Spannungen an den Kanten um das Bohrloch herum wurden die Netzelemente mit einer Größe von  $10 \mu\text{m}$  feiner eingestellt. Die feste Lagerung wurde an den Enden der freien Stromschienen definiert (Bild 7.5), sodass sich die Volumenkörper im Bereich der Schraubenverbindung zwischen Schraubenkopf und Mutter frei verformen können.

#### Berechnung der mechanischen Spannungsverteilung

Ausgewertet wurde die mechanische Spannungsverteilung in den inneren Trennfugen der Schraubenverbindung mit Stromschienen. Es wurden die einaxiale Normalspannung  $\sigma_N$  senkrecht auf den betrachteten Trennfugen und die Vergleichsspannung (von Mises) ermittelt. Nach der Gestaltänderungshypothese (von Mises) ist der Vergleich zwischen der ermittelten Vergleichsspannung aus einem mehraxialen Spannungszustand mit der mechanischen Spannung aus einer einaxialen mechanischen Belastung im Zugversuch an einer Werkstoffprobe möglich. Die Vergleichsspannung nimmt einen Wert von  $\sigma = 0 \text{ N mm}^{-2}$  an, wenn die Spannungen in allen Raumrichtungen gleich groß sind. Nach [56] liefert die Vergleichsspannung (von Mises) gute Übereinstimmungen im Vergleich zu Experimenten zum Kriechen von Werkstoffen unter einem mehrachsigen Spannungszustand. Die Werte der mechanischen Spannung sind jeweils für die Position  $x$  in der betrachteten Trennfuge angegeben. Die Symmetrieachse ist die Mittelachse der Durchgangsbohrung in den Stromschienen. Es entsteht eine zum Bohrloch symmetrische mechanische Spannungsverteilung in Längs- und Querrichtung der Stromschienen. In den Trennfugen zwischen den Fügeelementen sind die Werte der mechanischen Spannung in beiden Richtungen identisch und wurden nur in Längsrichtung dargestellt (Bild 7.6 und Bild 7.7).

<sup>16</sup> Einachsige Zugversuche: (Form B) nach [N19], Firma Hydro Aluminium Rolled Products GmbH

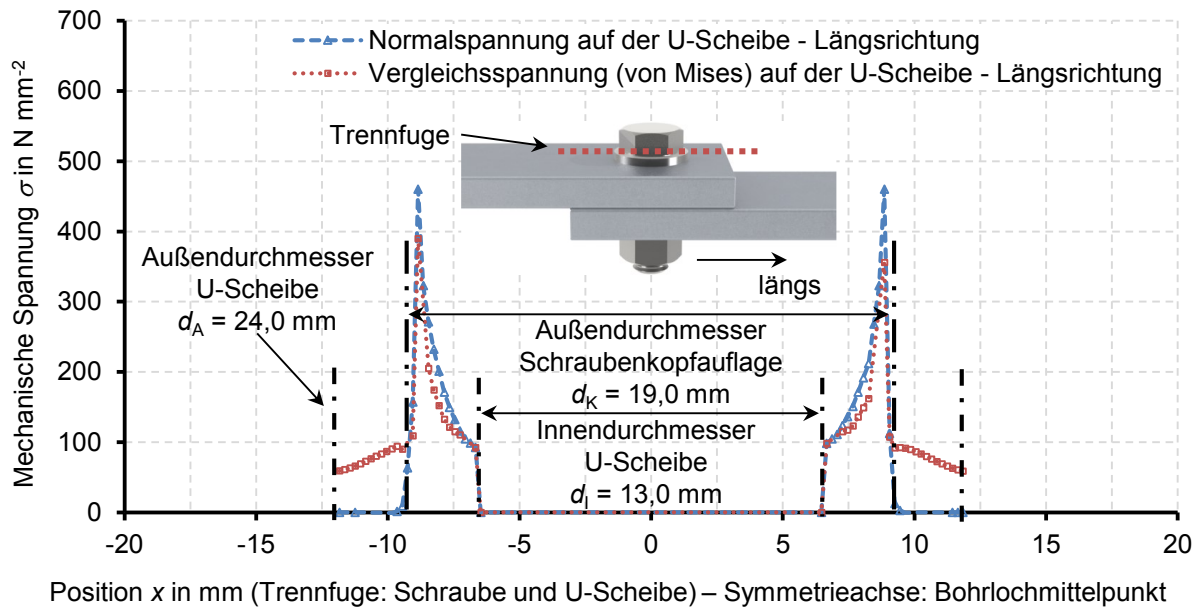


Bild 7.6: Numerisch berechnete mechanische Spannungsverteilung in der Trennfuge zwischen dem Schraubenkopf und der Unterlegscheibe einer Schraubenverbindung (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14

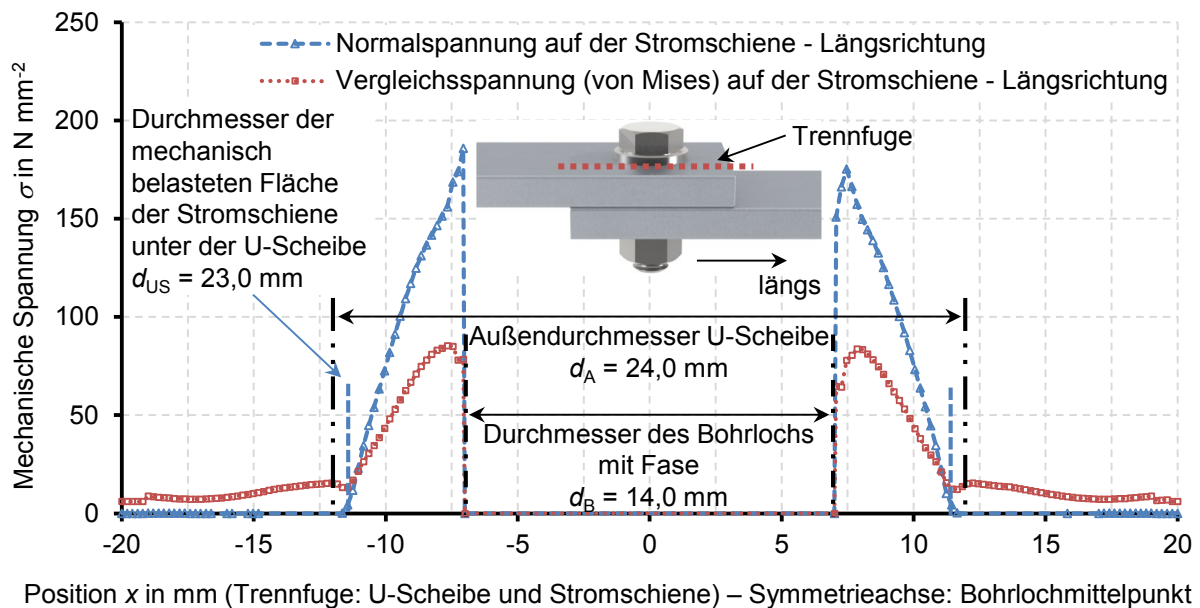


Bild 7.7: Numerisch berechnete mechanische Spannungsverteilung in der Trennfuge zwischen der Unterlegscheibe und der Oberfläche der Stromschiene einer Schraubenverbindung (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14

Die Maximalwerte der mechanischen Spannung sind für die ermittelte Vergleichsspannung (von Mises) geringer als für die ausgewerteten Normalspannungen senkrecht auf den mechanisch belasteten Flächen. Unter der Kopfauflage der Schraube wurden mit etwa  $\sigma_N = 460 \text{ N mm}^{-2}$  (Bild 7.6) und am Rand der Bohrung mit Fase in der Stromschiene mit  $\sigma_N = 180 \text{ N mm}^{-2}$  (Bild 7.7) die höchsten Werte der mechanischen Spannung bestimmt. In der Trennfuge zwischen den Fügeelementen aus Stahl ist dieser Wert kleiner als die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  des Werkstoffs (Tabelle 6.2, Tabelle 7.1) und führt zu einer rein elastischen Verformung. Beim mechanischen Kontakt zwischen der Unterlegscheibe und der Oberfläche

der Stromschiene aus Al 99,5(A) H14 führen die hohen mechanischen Normalspannungen zu einer plastischen Verformung und zu einem Verfestigen des Aluminiums an der Oberfläche (Kapitel 4.2.1). Durch die plastische Verformung verteilt sich die mechanische Spannung homogener auf einer größeren Fläche und nimmt mit einer maximalen mechanischen Vergleichsspannung von etwa  $\sigma = 90 \text{ N mm}^{-2}$  Werte im Bereich der Dehngrenze des Al 99,5(A) H14 (Tabelle 6.2, Tabelle 7.1) an. Bereits bei der Montage wird die Unterlegscheibe dadurch in die Aluminiumoberfläche eingepresst und führt bei hohen Temperaturen zu einer weiteren viskoplastischen Verformung und damit einem schnellen Abbau der Kontaktkraft (Bild 7.8).

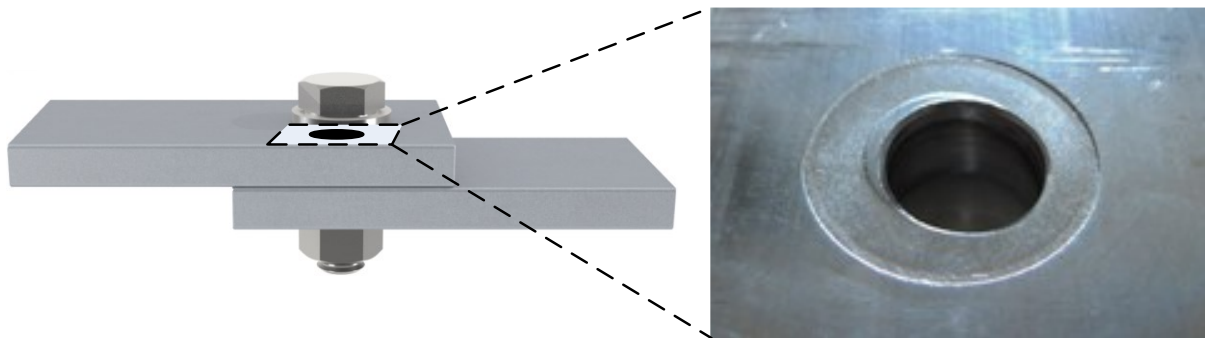


Bild 7.8: Oberfläche einer Stromschiene aus Al 99,7 einer geöffneten Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente ((OFF) – Kapitel 6.2.1) nach einer thermischen Beanspruchung von 90 °C für eine Zeit von 8.300 h

Analytisch wird für eine homogen mechanisch belastete Unterlegscheibe im System M12 [N24] mit einem Innendurchmesser von  $d_I = 13 \text{ mm}$  (Bild 7.6) und einem Außendurchmesser von  $d_A = 24 \text{ mm}$  bei einer Kraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  eine mittlere mechanische Spannung von  $\sigma_{US} \approx 78 \text{ N mm}^{-2}$  berechnet (Gl. (30)).

$$\sigma_{US} = \frac{F_K}{\pi \cdot \left( \frac{d_A^2}{4} - \frac{d_I^2}{4} \right)} \quad (30)$$

$d_A$  ... Außendurchmesser der Unterlegscheibe [N24]  
 $d_I$  ... Innendurchmesser der Unterlegscheibe

Für die Trennfuge zwischen der Unterlegscheibe und der Oberfläche der Stromschiene in der Schraubenverbindung erhöht sich dieser Wert auf  $\sigma_{US} \approx 96 \text{ N mm}^{-2}$  durch die kleinere mechanisch belastete Fläche. Die wirksame Fläche der Unterlegscheibe reduziert sich durch den größeren Radius des Bohrlochs in der Stromschiene mit Berücksichtigung der Fase und der maximalen Durchmesser des Druckkegels von  $d_{US} = 23 \text{ mm}$  (Bild 7.7) in diesem Bereich. Die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  des Al 99,5(A) H14 ist kleiner als dieser Wert (Tabelle 6.2, Tabelle 7.1). Es wird somit auch für den analytisch berechneten mittleren Wert ein plastisches Verformen des Aluminiums unter der Unterlegscheibe bereits bei der Montage erwartet.

In der Trennfuge zwischen den Stromschienen wurden unmittelbar am Rand der Bohrung mit Fase die höchsten Werte der Normalspannung bis etwa  $\sigma_N = 130 \text{ N mm}^{-2}$  und einer Vergleichsspannung von etwa  $\sigma = 80 \text{ N mm}^{-2}$  bestimmt (Bild 7.9).



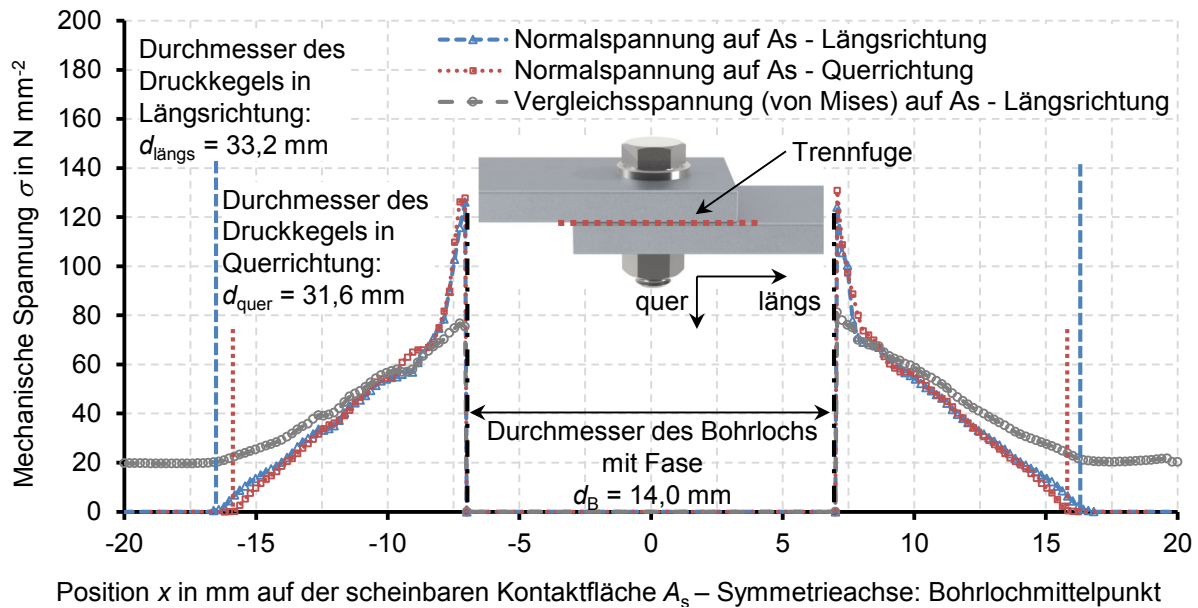


Bild 7.9: Mechanische Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  einer Schraubenverbindung ((OFF) - (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14

Die Verteilung der mechanischen Spannung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  ähnelt einem Kegelstumpf mit Hohlzylinder vergleichbar zu dem analytischen Ansatz für die Berechnung der Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$  (Bild 7.3). In Längsrichtung verteilt sich die mechanische Spannung um 0,8 mm weiter als in Querrichtung, sodass eine geringe Ellipsenform der mechanisch belasteten Fläche entsteht. Zum Verifizieren des mechanischen Berechnungsmodells wurden Versuche mit Druckmessfolien durchgeführt.

#### Experimentelle Untersuchung zur mechanischen Spannungsverteilung

Die Verteilung der mechanischen Spannung, in der Trennfuge zwischen den Stromschienen der Schraubenverbindung, wurden mit Druckmessfolien<sup>17</sup> ermittelt (Bild 7.10).

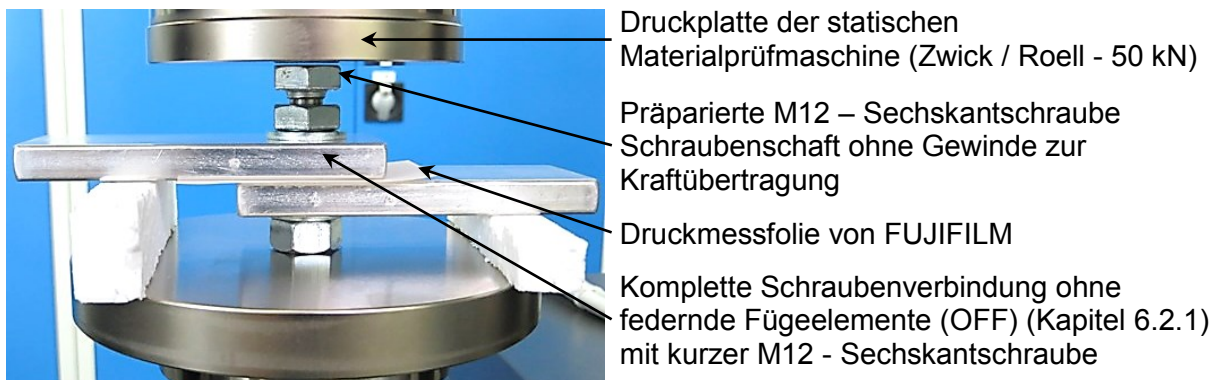


Bild 7.10: Versuchsaufbau zum Messen der mechanischen Spannung mit Druckmessfolien in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14

<sup>17</sup> Druckmessfolie: Typ Prescale, Firma FUJIFILM Europe GmbH

Die Druckmessfolien bestehen aus einer Farb- und einer Entwicklerschicht. Unter Druckbelastung werden die unterschiedlich großen, flüssigkeitsgefüllten Kammern in der Farbschicht, abhängig von der lokalen mechanischen Spannung, zerdrückt. Auf der Entwicklerschicht entsteht dadurch eine Farbveränderung. Abhängig von der Intensität dieser Farbveränderung erfolgte mit einer optischen Analysesoftware (FDP-8018E von FUJIFILM) eine Auswertung der lokalen mechanischen Spannung. Es wurden bei den Experimenten mehrere Arten der Druckmessfolien verwendet. Jede Art hatte einen minimalen und maximalen Messbereich, in dem optisch analysiert werden konnte (Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2: Firmenbezeichnung und Messbereiche der Druckmessfolienarten

Bezeichnung	Folienart	Messbereich	
		Minimaler Druck in N mm <sup>-2</sup>	Maximaler Druck in N mm <sup>-2</sup>
HHS	Superhoher Druck	130	300
HS	Hoher Druck	50	130
MS	Mittlerer Druck	10	50
LW	Niederdruck	2,5	10
LLW	Superniederdruck	0,6	2,5

Die Untersuchungen wurden an einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit den Abmessungen 40 mm x 10 mm x 100 mm durchgeführt. Untersucht wurden Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1). Der Kontaktbereich in der Überlappung zwischen den beiden Stromschienen betrug 1.600 mm<sup>2</sup> abzüglich Bohrloch. Zusätzlich zum Bohrl Lochdurchmesser von 13 mm wurde beim Auswerten die Fase am Bohrl Lochrand mit einer Breite von 0,5 mm berücksichtigt. Es wurden die Kontaktflächen der Stromschienen (Anlieferungszustand) vor dem Belasten nur mit Ethanol und einem Tuch gereinigt. Dadurch wurden Partikel von der Oberfläche entfernt, die zu unerwünschten lokalen Spannungsüberhöhungen während der Messung geführt hätten. Die Schraubenverbindung wurde in einer Materialprüfmaschine einaxial in Druckrichtung mit einer maximalen Kraft von 25 kN, identisch zu der Kontaktkraft in den Langzeitversuchen, belastet. Um die Kontaktkraft übertragen zu können wurde die Sechskantschraube innerhalb der Verbindung gekürzt und zusätzlich eine weitere präparierte Sechskantschraube oberhalb der Verbindung hinzugefügt (Bild 7.10). Der Schaft dieser zusätzlichen Schraube wurde spanabhebend bis auf den Kern reduziert und diente als Druckauflage für die Schraube in der Verbindung. Damit erfolgte ein realitätsnahes Übertragen der Kontaktkraft in den Kern des Schraubenschaftes und es wurde sichergestellt, dass sich der Schraubenkopf unter Last verformen kann.

Die Versuche erfolgten bei Raumtemperatur und nach den spezifischen Herstellerangaben für das Messen mit Druckmessfolien (Tabelle 7.3).

Tabelle 7.3: Randbedingungen bei der Messung mit Druckmessfolien

Umgebungstemperatur	26 °C
Relative Luftfeuchte	33 %
Zeit bis Maximalkraft	120 s mit linearem Anstieg der Kraft
Haltezeit bei Maximalkraft	120 s mit Lageregelung der Materialprüfmaschine
Zeit beim Entspannen	abrupt

Die einzelnen Druckmessfolien wurden nacheinander zwischen den Stromschienen mechanisch belastet. Für mechanische Spannungen kleiner als  $10 \text{ N mm}^{-2}$  wurden annähernd ellipsenförmige Druckbereiche optisch detektiert. Bei einem Messbereich größer als  $50 \text{ N mm}^{-2}$  wurden nahezu konzentrische Kreisringflächen bestimmt (Bild 7.11).

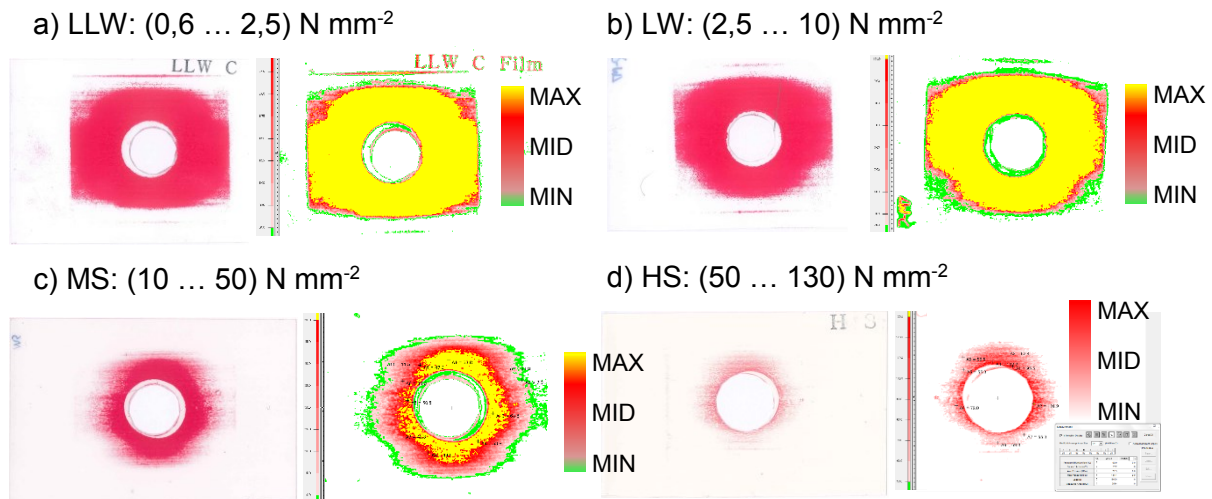


Bild 7.11: Rot verfärbte Druckmessfolien abhängig vom Messbereich der mechanischen Spannung (Folien: „LLW“ - a), „LW“ - b), „MS“ - c), „HS“ - d)) nach der Druckbelastung (links) und softwaregestützten optischer Auswertung (rechts)

Bei der Analyse der Druckmessfolien vom Typ „HS“ und „HHS“ wurden in einem engen Bereich um das Bohrloch herum die höchsten Werte bis etwa  $165 \text{ N mm}^{-2}$  bestimmt (Bild 7.11, Bild 7.12).

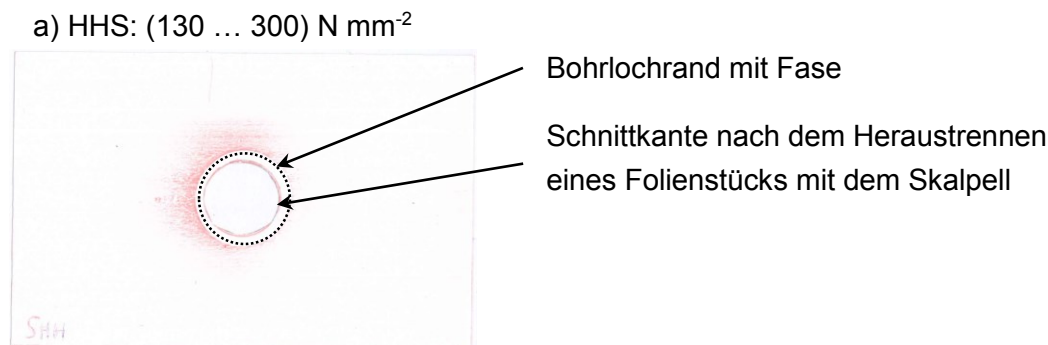


Bild 7.12: Druckmessfolie mit der Bezeichnung „HHS“ nach dem Experiment

In dem Spannungsbereich zwischen  $(0,0 \dots 170) \text{ N mm}^{-2}$  erfolgte eine softwaregestützte Auswertung der eingescannten Druckmessfolien bei der Firma FUJIFILM. Hierbei wurde je nach Intensität der Verfärbung jedem Abtastwert ein Wert der mechanischen Spannung zugeordnet. Ein Flächenelement von  $1 \text{ mm}^2$  wurde in eine Abtastmatrix mit acht Datenpunkten eingeteilt.

Mit dieser softwaregestützten Analysemethode und der optischen Analyse der belasteten Folien wurde die mechanische Spannung im gesamten Kontaktbereich der Schraubenverbindung ermittelt und in Längs- und Querrichtung in Bezug zum Bohrlochmittelpunkt dargestellt (Bild 7.13).



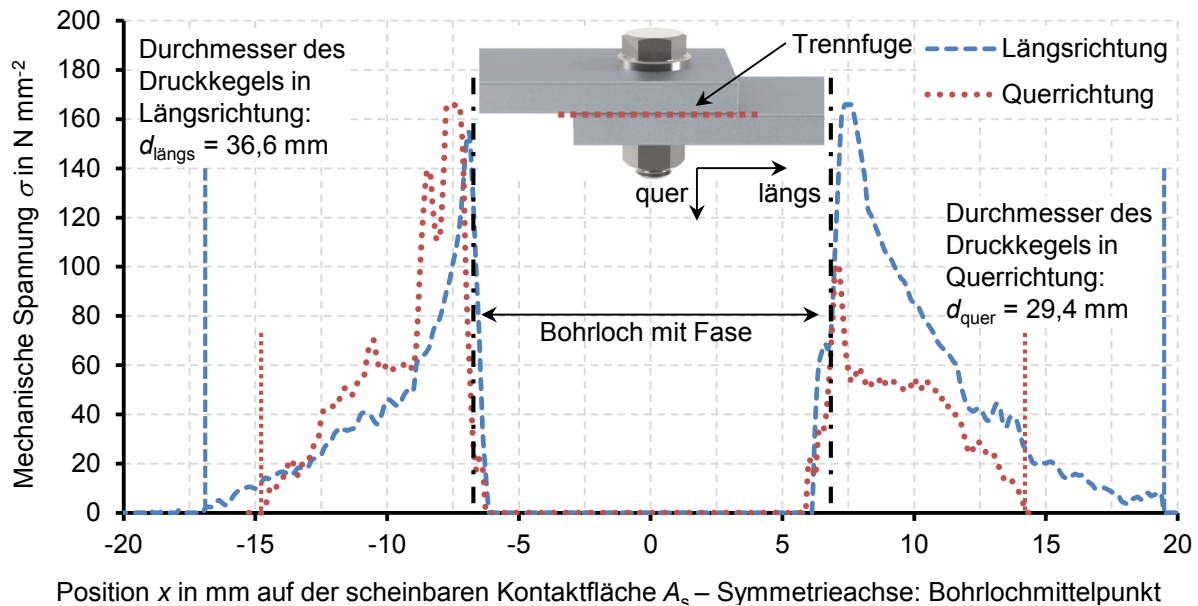


Bild 7.13: Mechanische Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 (experimentell mit Druckmessfolien bestimmt)

Ausgehend von der Mittelachse der Bohrung wurden für jede Position  $x$  in der Kontaktebene zwischen den Stromschienen der Mittelwert aus zehn Datenpunkten berechnet. Dargestellt sind die Werte der mechanischen Spannung für die Quer- und Längsrichtung. Für den Messbereich zwischen  $(10 \dots 130) \text{ N/mm}^2$  ist für die Druckmessfolien eine Genauigkeit von  $\pm 10 \%$  vom Hersteller vorgegeben. Außerhalb dieses Messbereiches konnten durch die Software weitere Werte der mechanischen Spannung ermittelt werden.

Vor dem mechanischen Belasten der Stromschienen in der Materialprüfmaschine kam es insbesondere in Längsrichtung zum Verschieben der beiden Stromschienen gegeneinander. Dadurch ist in der Darstellung die Symmetrieachse für die gemessene mechanische Spannung etwas außerhalb des Bohrungsmittelpunktes (Bild 7.13).

Abhängig vom Wert der mechanischen Spannung ist anhand der Darstellung für die Längs- und die Querrichtung die Form des mechanischen Einwirkbereichs auch in der grafischen Darstellung wieder zu finden. Bei kleinen mechanischen Spannungen verteilt sich der Druckkegel in Querrichtung etwa 15 mm vom Bohrungsmittelpunkt aus. In Längsrichtung ist der Druckkegel breiter, sodass Ellipsen entstehen. Bei der analytischen Berechnung der Ersatzquerschnittsfläche  $A_{\text{ers}}$  wird im Gegensatz dazu immer ein zum Bohrerloch konzentrischer Kreisring berechnet. Im Vergleich zur numerischen Berechnung der mechanischen Spannungsverteilung in der Schraubenverbindung wurden am Rand des Bohrerlochs mit Fase höhere Werte in der Trennfuge zwischen den Stromschienen ermittelt (Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4: Flächeninhalt und mechanische Spannung auf den experimentell bestimmten und berechneten mechanisch belasteten Flächen in einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente ((OFF) - Kapitel 6.2.1)

Mechanisch belastete Fläche	Flächeninhalt in mm <sup>2</sup>	Maximale $\sigma_{\text{Max}}$ und mittlere mechanische Spannung $\sigma_{\text{Mittel}}$ in N mm <sup>-2</sup> für eine Kontaktkraft von $F_K = 25$ kN
Analytischer Ansatz: $A_{\text{ers}}$ (Bild 7.3), [46]	541	$\sigma_{\text{Max}} = \sigma_{\text{Mittel}} = 46,2$
Experiment zur schwach oxidierten Kontaktfläche: $A_{\text{oxi}}$ (Bild 7.4), [46]	525	$\sigma_{\text{Max}} = \sigma_{\text{Mittel}} = 47,6$
Numerische Berechnung: $A_{\text{FEM}}$ (Bild 7.9)	610	Normalspannung: $\sigma_{\text{N,Max}} = 130$ ; $\sigma_{\text{N,Mittel}} = 41,0$
		Vergleichsspannung: $\sigma_{\text{Max}} = 80$ ; $\sigma_{\text{Mittel}} = 41,0$
Experiment mit Druckmessfolien: $A_{\text{Folie}}$ (Bild 7.13, Tabelle 7.5)	670	$\sigma_{\text{Max}} = 165$ ; $\sigma_{\text{Mittel}} = 37,0$

Zum Modellieren der Kontaktflächen  $A_{\text{KF},n}$  im numerischen Berechnungsmodell zum elektrischen Kontaktverhalten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen (Kapitel 7.1.2) werden die Abmessungen und die entsprechenden Werte der mechanischen Spannung auf diesen Kontaktflächen benötigt. Beide Parameter wurden aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen mit Druckmessfolien ermittelt. Zum Bestimmen der Kontaktflächen wurden aus der Darstellung (Bild 7.13) die Ellipsenhalbachsen  $a$  und  $b$  in Quer- und Längsrichtung entsprechend des Wertes der mechanischen Spannung ermittelt (Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Kontaktfläche abhängig von der mechanischen Spannungsverteilung

Mechanische Spannung $\sigma \geq y$ in N mm <sup>-2</sup>	Ellipsenhalbachsen		Analytische Berechnung mit Gl. (31)) $A_{\text{K,(OFF)}}$ in mm <sup>2</sup>	Auswertung mit der Software von FUJIFILM $A_{\text{Software}}$ in mm <sup>2</sup>	Verhältnis zur scheinbaren Kontaktfläche ( $A_s = 1.600$ mm <sup>2</sup> ) $A_{\text{Software}} / A_s$
	Quer: $a$ in mm	Längs: $b$ in mm			
2,5	14,4	18,2	670	-	-
5	14,3	17,8	647	-	-
10	14,2	16,3	573	574	36 %
20	13,5	14,1	443	413	26 %
30	12,4	13,0	354	307	19 %
40	12,0	12,3	307	243	15 %
50	11,3	10,5	216	199	12 %
60	Kreisringfläche mit einem gemeinsamen Radius konzentrisch um das Bohrloch			144	9 %
80				91	6 %
100				60	4 %
130				30	2 %
160				20	1,3 %

Mit den Ellipsenhalbachsen  $a, b$  und dem Flächeninhalt des Bohrlochs inklusive Fase  $A_B$  wurde der Flächeninhalt  $A_{\text{K,(OFF)}}$  für die Kontaktfläche in einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen berechnet (Gl. (31)).

$$A_{K,(OFF)} = \pi \cdot a \cdot b - \pi \cdot \frac{d_B^2}{4} \quad (31)$$

mit  $a$  ... kleine Halbachse und  $b$  ... große Halbachse einer Ellipse

Zum Abschätzen des Fehlers bei der Flächenberechnung für die Ellipsenform wurde der exakte Flächeninhalt  $A_{Software}$  mit der Software von FUJIFILM ermittelt. Damit wurde die Summe der mechanisch belasteten Flächenelemente abhängig von der mechanischen Spannung bestimmt. Die Differenz zwischen dem berechneten Flächeninhalt  $A_{K,(OFF)}$  der Ellipsen und dem Flächeninhalt  $A_{Software}$  ist gering (Tabelle 7.5).

### 7.1.2 Elektrisches Berechnungsmodell

Zum Berechnen des elektrischen Kontaktverhaltens wurde in mehreren Schritten ein komplexes Modell für eine Schraubenverbindung mit Stromschienen ohne federnde Fügeelemente ((OFF) - Kapitel 6.2.1) erstellt (Bild 7.14).

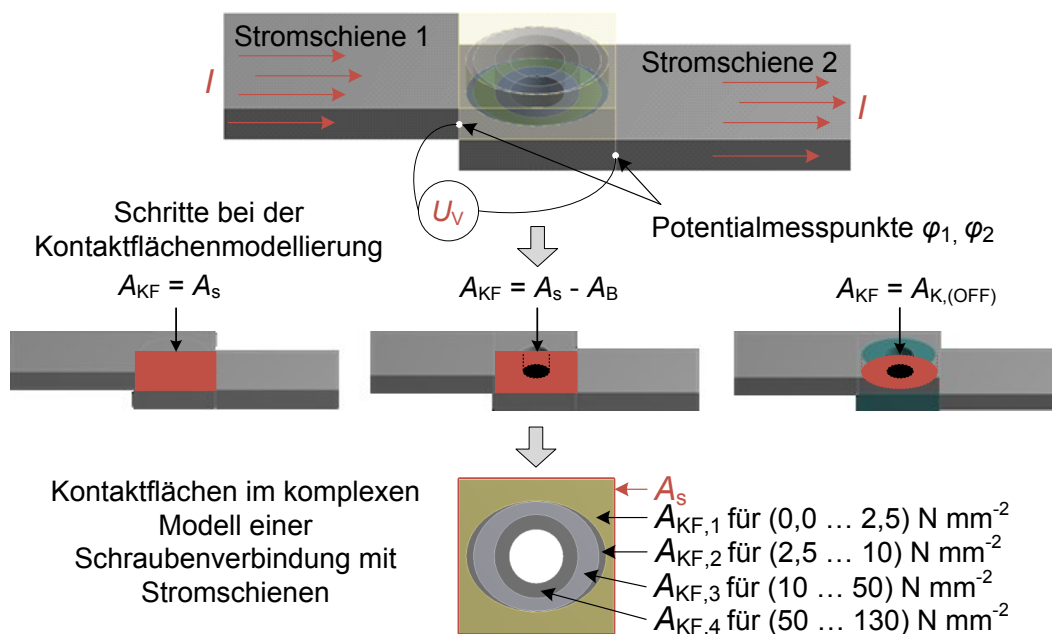


Bild 7.14: Berechnen des elektrischen Kontaktverhaltens von Verbindungen mit Stromschienen, abhängig von der kontaktierten Fläche und mechanischen Spannungsverteilung (schematisch)

Die Kontaktflächen  $A_{KF,n}$  im Modell der Schraubenverbindung mit Stromschienen (Bild 7.14) wurden entsprechend der Messbereiche der Druckmessfolien (Bild 7.11) modelliert. Die Abmessungen der Stromschienen  $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  entsprechen denen aus den experimentellen Untersuchungen (Tabelle 6.3). Das Bohrloch wurde mit einem Durchmesser von  $d_B = 14 \text{ mm}$  modelliert. Damit ist der stromlose Bereich im Bohrloch und der zusätzlichen Fase berücksichtigt. Mit dem Modell wurde ausschließlich das elektrische Kontaktverhalten in der Verbindung berechnet. Der sehr geringe Anteil des Stromes, der über die Fügeelemente aus Stahl fließt, wurde vernachlässigt.

Auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  (Bild 7.14, vgl. Bild 3.3), im Überlappungsbereich der beiden Stromschienen  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , wurde zwischen den sich berührenden Körpern eine

Kontaktfläche erzeugt. Diese Kontaktfläche wird mit einem elektrischen, flächenbezogenen Leitwert  $G'$  parametrisiert und hat keinen physikalischen Materialwiderstand. Der flächenbezogene Leitwert  $G'$  mit der Einheit Siemens pro Quadratmillimeter ( $S\text{ mm}^{-2}$ ) bestimmt die Stromdichteverteilung in der Verbindung. Eine Kontaktfläche mit einem sehr hohen Leitwert entspricht dabei einem Bereich mit einem guten elektrischen Kontakt. Dieser befindet sich im Bereich mit hoher mechanischer Spannung, z. B. um das Bohrloch. An dieser Stelle formieren sich am wahrscheinlichsten viele und großflächige Mikrokontakte, die den größten Anteil des Stromes übertragen. Damit wurde das tatsächlich stromführende Material der Stromschiene (vgl. Bild 3.4) im Rechenmodell den realen Verhältnissen angepasst. Durch das Definieren mehrerer Kontaktflächen ( $A_{KF,1} \dots A_{KF,n}$ ) wird der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Kontaktverhalten und der mechanischen Spannungsverteilung hergestellt. Jede Kontaktfläche  $A_{KF,n}$  mit entsprechendem Leitfähigkeitswert  $G' = f(\sigma)$  definiert dabei einen Bereich mit einer mittleren mechanischen Spannung.

Im numerischen Berechnungsmodell wurde in die Stirnfläche der Stromschiene 1 ein Strom  $I$  von 100 A homogen eingespeist (Bild 7.14). Dieser Strom fließt durch die modellierte Kontaktfläche in die Stromschiene 2 und dort am Ende wieder heraus. Vergleichbar zur realen Messung des Verbindungswiderstandes mit einem Mikroohmmeter (Bild 3.5) wurden die Potentiale  $\varphi_1, \varphi_2$  an einer Seite der Verbindung in der Mitte der Stromschienen ermittelt. Die Potentialdifferenz  $U_V$ , zum Bestimmen des Verbindungswiderstandes  $R_V$  mit dem Strom  $I$ , wurde aus diesen Potentialwerten berechnet (Gl. (32), Gl. (33)).

$$U_V = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (32)$$

$$R_V = \frac{U_V}{I} \quad (33)$$

Es wurde keine thermische Berechnung durchgeführt, sodass der Wert des berechneten Verbindungswiderstandes  $R_V$  in diesem Modell, nicht vom Wert des Stromes und dem temperaturabhängigen Materialwiderstand der Stromschienen abhängt. Zum Vergleich der berechneten Werte mit den Ergebnissen aus den Langzeitversuchen wurde der Gütefaktor für die Verbindung mit Stromschienen bestimmt (Gl. (34)).

$$k_u = \frac{R_V}{R_{Al\ 99,5(A)}} = \frac{R_V}{2,83\ \mu\Omega} \quad (34)$$

mit  $R_{Al\ 99,5(A)} = 2,83\ \mu\Omega$

für einen homogenen Leiterabschnitt


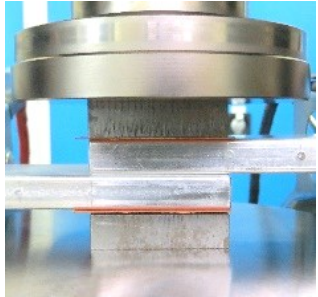


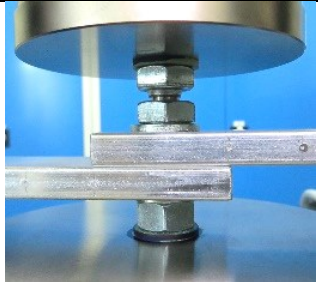
mit den Abmessungen 40 mm x 10 mm x 40 mm

Als Werkstoff für die Stromschienen wurde das Al 99,5(A) H14 aus den experimentellen Untersuchungen in der Materialbibliothek von ANSYS spezifiziert. Die Feinheit des Netzes ist in den Stromschienen und speziell in den Bereichen hoher Stromdichten so gewählt, dass durch eine ausreichende Elementanzahl Diskretisierungsfehler vermieden wurden.

Bei idealer elektrischer Kontaktierung zweier Stromschienen beträgt der Kontaktwiderstand  $R_K = 0\ \mu\Omega$  (Kapitel 3.1, Gl. (13)). Für diesen Fall entsteht die Kontaktfläche auf der gesamten scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$ . Der Minimalwert des Gütefaktors von  $k_{u,ideal} = 0,5$  (Kapitel 3.2)

wird wegen der Stromdichteverteilung in der Verbindung nicht erreicht. Beim Kommutieren des Stromes / von Stromschiene 1 zu Stromschiene 2 wird nicht der gesamte Querschnitt der Schienen homogen durchströmt. So erhöht sich der tatsächlich stromdurchflossene Materialwiderstand und dadurch auch der berechnete Minimalwert des Gütefaktors auf  $k_{u,ideal} = 0,63$  (Tabelle 7.6).

Tabelle 7.6: Ergebnisse der Berechnung mit unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen zwei Stromschienen und die experimentelle Versuchsanordnung zum Verifizieren der Modelle

Berechnungsmodell in ANSYS / Kontaktbereich	Berechnungsergebnis: minimaler Gütefaktor	Experimentelle Versuchsanordnung zum Verifizieren (Bild 7.17)
Ideale Kontaktierung auf $A_s$ 	$k_{u,ideal} = 0,63$	
Ideale Kontaktierung auf $A_s$ und Stromschienen mit Bohrloch 	$k_{u,ideal} = 0,72$	
Ideale Kontaktierung auf einer Kontaktfläche mit variabler Form und Stromschienen mit Bohrloch 	$k_{u,ideal} = 0,89$ Kontaktfläche mit elliptischer Form und einer mechanischen Spannung von $\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}$ (Tabelle 7.5) für die Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1)	

Die minimalen Werte der Gütefaktoren  $k_{u,ideal}$  wurden in [36] für Schraubenverbindungen mit Stromschienen verschiedener Geometrien und abhängig von der Anzahl der Bohrungen auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  ermittelt. Für eine Schraubenverbindung mit einer M12 - Sechskantschraube und Stromschienen mit einer Querschnittsfläche von (40 x 10) mm wurde der Wert von  $k_{u,ideal} \approx 0,7$  bestätigt (Tabelle 7.6) [36].

Mit jedem weiteren Schritt bei der Modellierung der Kontaktfläche in Richtung des realen elektrischen Verhaltens erhöht sich der Minimalwert des idealen Gütefaktors  $k_{u,ideal}$ . Die Bohrungen in den Stromschienen und die Form der stromführenden Kontaktfläche  $A_{KF}$  verändern die Stromdichteverteilung und damit den Gütefaktor.

Basierend auf den Messwerten zur Verteilung der mechanischen Spannung (Kapitel 7.1.1), wurde im Berechnungsmodell die Form und die Größe der Kontaktfläche  $A_{KF}$  variiert. Abhängig vom Verhältnis zwischen dem Flächeninhalt der modellierten Kontaktfläche zur gesamten scheinbaren Kontaktfläche wurde der Minimalwert des Gütefaktors  $k_{u,ideal}$  bestimmt (Bild 7.15).

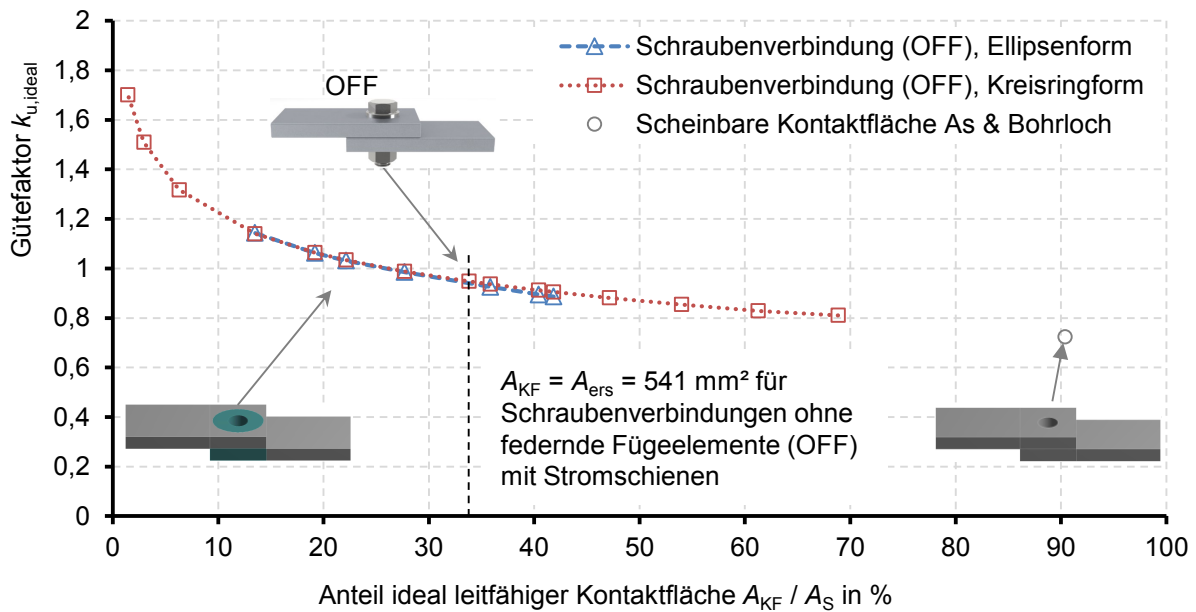


Bild 7.15: Idealer Gütefaktor  $k_{u,ideal}$  einer Schraubenverbindung mit Stromschienen 40 mm x 10 mm x 100 mm abhängig von der Form und Größe der ideal leitfähigen Kontaktfläche bezogen auf die scheinbare Kontaktfläche  $A_S$

Je kleiner die stromführende Kontaktfläche um das Bohrloch herum ist, desto höher sind die Werte der theoretisch möglichen Gütefaktoren  $k_{u,ideal}$ . Die Differenz zwischen den berechneten Gütefaktoren für verschiedene Formen der Kontaktfläche (Ellipse oder Kreisring), bei gleichem Flächeninhalt, ist nicht signifikant. Für eine Kontaktfläche mit dem Flächeninhalt des analytisch berechneten Ersatzquerschnitts  $A_{ers}$  (Bild 7.3) wurde ein Minimalwert von etwa  $k_{u,ideal} = 0,95$  bestimmt. In experimentellen Untersuchungen an Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 wurden höhere Werte des Gütefaktors  $k_{u,real}$  ermittelt. Im Vergleich zur Berechnung des Idealfalls sind die höheren Werte mit einem zusätzlichen Kontaktwiderstand  $R_K$  durch Engstellen und Fremdschichten oder auf die Dimensionen der wahren stromführenden Kontaktfläche zurückzuführen. Zum Verifizieren des numerischen Berechnungsmodells und zum Herleiten eines komplexen Modells mit dem der Zusammenhang zur mechanischen Spannungsverteilung hergestellt wird, wurden weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt.



### Experimentelle Untersuchungen zum elektrischen Kontaktverhalten und Herleiten des komplexen numerischen Berechnungsmodells einer Schraubenverbindung mit Stromschienen

Zum Verifizieren der numerischen Berechnungsmodelle und zum Bestimmen des Zusammenhangs zwischen dem Verbindungswiderstand  $R_V$  und der Kontaktkraft  $F_K$  wurden experimentelle Untersuchungen in einer Materialprüfmaschine durchgeführt (Bild 7.16).

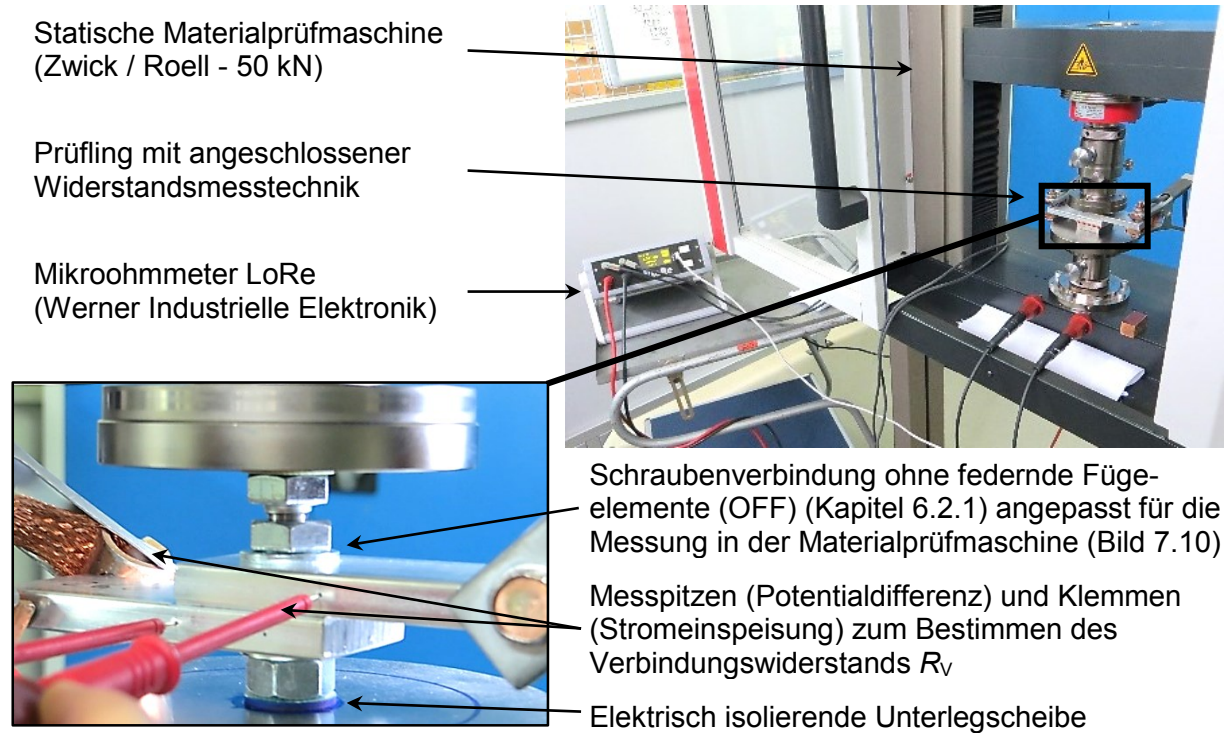


Bild 7.16: Versuchsaufbau zum Messen des Verbindungswiderstands  $R_V$  abhängig von der Kontaktkraft  $F_K$  an Schraubenverbindungen mit Stromschienen

Die Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 wurden im Anlieferungszustand bei Raumtemperatur untersucht. Bei dem numerisch berechneten idealen Gütefaktor  $k_{u,ideal}$  von Verbindungen mit Stromschienen und unterschiedlichen Kontaktflächen war der Kontaktwiderstand  $R_K = 0 \mu\Omega$  (Tabelle 7.6, Bild 7.15). Um in den experimentellen Untersuchungen einen vergleichbar niedrigen  $R_K$  zu erhalten, wurden die Kontaktflächen der Stromschienen mit Ethanol gereinigt und gebürstet, um Fremdschichten auf den Aluminiumoberflächen zu entfernen. Mit der Materialprüfmaschine wurde die Kontaktkraft stufenweise erhöht. Das Messen der Druckkraft und des Verspannweges erfolgte mit einem Kraft- und einem Wegaufnehmer. In jeder Kraftstufe wurde der Verbindungswiderstand  $R_V$  (Bild 3.5) mehrmals mit einem Mikroohmmeter<sup>18</sup> (Bild 7.16) gemessen. Um ein Formieren der Mikrokontakte während der Druckbelastung zuzulassen, wurde während der Messphasen die jeweilige Kraftstufe lagegeregt gehalten. Nach etwa zwei Minuten je Kraftstufe hat sich ein konstanter Wert des Verbindungswiderstandes eingestellt. Mit dem materialspezifischen Temperaturbeiwert von  $\alpha_T \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$  (Tabelle 2.2) und der beim Versuch an der Oberfläche der Verbindung

<sup>18</sup> Mikroohmmeter: Typ LoRe®, Firma Werner Industrielle Elektronik

gemessenen Temperatur<sup>19</sup>  $\vartheta_V$  wurde der Verbindungswiderstand  $R_V$  auf den Wert bei 20 °C umgerechnet (Gl. (35)).

$$R_V(20^\circ\text{C}) = \frac{R_V(\vartheta_V)}{1 + \alpha_T(\vartheta_V - 20^\circ\text{C})} \quad (35)$$

Die Untersuchungen wurden an Verbindungen mit verschiedenen Fügeelementen und an Stromschienen mit Bohrloch und ohne Bohrloch durchgeführt. Beim Kontaktieren der Stromschienen auf der gesamten scheinbaren Kontaktfläche  $A_s = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  wurden zwei Stahlplatten mit den Abmessungen  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  als zusätzliche Fügeelemente zwischen die Druckplatten der Materialprüfmaschine gelegt (Tabelle 7.6). Für die Messungen an einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen wurden die Fügeelemente für die Messung in der Materialprüfmaschine angepasst (Bild 7.10). Die Stromschienen wurden in Richtung der Druckplatten der Materialprüfmaschine mit Unterlegscheiben aus glasfaserverstärktem Epoxydharz elektrisch isoliert (Bild 7.16).

Aus dem Mittelwert der gemessenen Verbindungswiderstände und dem Materialwiderstand der Stromschienen wurde der Gütefaktor  $k_{u,\text{real}}$  (Gl. (16), Bild 3.5) abhängig von der Kontaktkraft bestimmt (Bild 7.17).

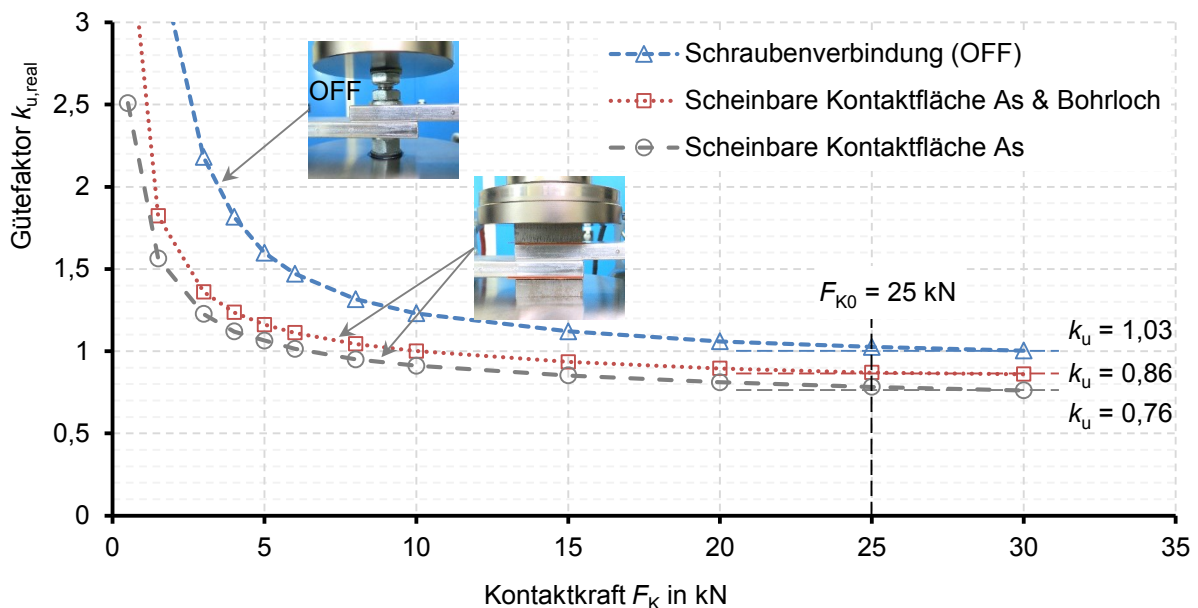





Bild 7.17: Realer Gütefaktor  $k_{u,\text{real}}$  für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit einer scheinbaren Kontaktfläche von  $A_s = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  (mit und ohne Bohrung) für verschiedene Fügeelemente und abhängig der Kontaktkraft  $F_K$

Mit zunehmender Kontaktkraft  $F_K$  nähern sich die Gütefaktoren  $k_{u,\text{real}}$  einem Minimalwert an. Es wurden in den experimentellen Untersuchungen (10 ... 20) % höhere Werte des Gütefaktors, im Vergleich zu den berechneten, bestimmt (Tabelle 7.7).

<sup>19</sup> Temperaturmessgerät mit Fühler: Typ Almemo, Firma Ahlborn



Tabelle 7.7: Vergleich der berechneten und experimentell bestimmten Ergebnisse zu Verbindungen mit unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen zwei Stromschienen (mit und ohne Bohrung) aus Al 99,5(A)

Kontaktbereich	Kontaktflächeninhalt	Berechnungsmodell		Experiment		Differenz mit Gl. (36)
		$k_{u,ideal}$	$R_{V,ideal}$	$k_{u,real}$	$R_{V,real}$	
Scheinbare Kontaktfläche $A_S$ 	$A_{KF} = A_{K,OB} = A_S = 1.600$	0,63	1,79 $\mu\Omega$	0,76	2,16 $\mu\Omega$	0,37 $\mu\Omega$
Scheinbare Kontaktfläche $A_S$ und Stromschienen mit Bohrloch 	$A_{KF} = A_{K,B} = 1.446$ mit Gl. (38)	0,72	2,04 $\mu\Omega$	0,86	2,44 $\mu\Omega$	0,40 $\mu\Omega$
Schraubenverbindung mit Stromschienen (OFF) 	$A_{KF} = A_{K,(OFF)} = 670$ mit Gl. (31) für eine Kontaktfläche mit einer mechanischen Spannung von $\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}$ (Tabelle 7.5)	0,89	2,52 $\mu\Omega$	1,03	2,91 $\mu\Omega$	0,39 $\mu\Omega$

Die Differenz  $\Delta R_V$  (Gl. (36)) zwischen dem gemessenen  $R_{V,real}$  und dem berechneten  $R_{V,ideal}$  entspricht in erster Näherung dem Kontaktwiderstand  $R_K$  der Verbindung (Kapitel 3.1, Gl. (13)).

$$\Delta R_V = R_{V,real} - R_{V,ideal} \quad (36)$$

Dabei ist die Schätzung des  $R_K$  umso genauer, je näher bei der Berechnung des  $R_{V,ideal}$ , der tatsächlich stromdurchflossene Materialanteil in der Verbindung, der Realität entspricht. Für die Berechnung des  $R_{V,ideal}$  wurde der flächenbezogene Leitwert  $G'$  als ideal hoch angenommen und die stromführende Kontaktfläche in ihren Abmessungen für das Modell der Schraubenverbindung ohne federnde Fügelemente (OFF) mit Stromschienen variiert. Die Lage und Größe, der in der Realität tatsächlich stromführenden Kontaktfläche für Schraubenverbindungen mit Stromschienen ist nicht bekannt und wurde basierend auf experimentellen Untersuchungen zur mechanischen Spannungsverteilung bestimmt (Kapitel 7.1.1, Tabelle 7.5, Gl. (31)).

Bei den experimentellen Untersuchungen mit den zusätzlichen quadratischen Stahlelementen ist makroskopisch betrachtet, die mechanisch kontaktierte Fläche  $A_{Mech}$  identisch mit der elektrisch kontaktierten Fläche  $A_{Elek}$  (Bild 7.18).

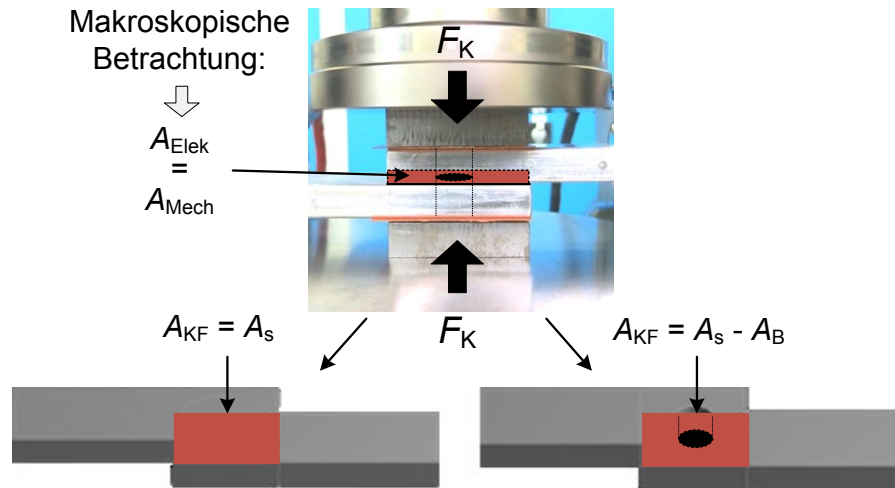


Bild 7.18: Mechanischer und elektrischer Kontakt zwischen den Stromschienen beim Verspannen mit Stahlelementen in der Materialprüfmaschine (schematisch)

Die Kontaktkraft  $F_K$  wurde bei diesen Versuchen über die Stahlelemente homogen auf der gesamten scheinbaren Kontaktfläche  $A_S$  verteilt. Der Flächeninhalt der mechanisch kontaktierten Fläche im Experiment und der ideal elektrisch kontaktierten Fläche im Berechnungsmodell ist identisch und bekannt (Gl. (37), Gl. (38)).

$$A_{KF} = A_{K,OB} = A_S \quad (37)$$

$$A_{KF} = A_{K,B} = A_S - A_B = A_S - \pi \cdot \frac{d_B^2}{4} \quad (38)$$

Der Flächeninhalt beträgt für die Verbindung zwischen zwei Stromschienen ohne Bohrung  $A_{K,OB} = 1.600 \text{ mm}^2$  und  $A_{K,B} = 1.446 \text{ mm}^2$  bei Stromschienen mit Bohrungen. Der Differenz  $\Delta R_V$  (Gl. (36)) zwischen dem experimentell ermittelten (Realfall) und dem berechneten Wert (Idealfall) ist damit identisch zum Kontaktwiderstand  $R_K$  (Tabelle 7.7). Der Kontaktwiderstand ist die Summe aus dem Enge- und den Fremdschichtwiderstand der Verbindung für das untersuchte Al 99,5(A) H14 mit dieser Oberflächenbeschaffenheit. Für Kontaktflächen, die anders vorbehandelt wurden, kann sich der gemessene Verbindungswiderstand  $R_{V,real}$  verändern. Die damit berechnete Differenz  $\Delta R_V$  hat damit einen direkten Einfluss auf den berechneten flächenbezogenen Leitwert  $G'$  (Gl. (39), Gl. (40)).

$$G_V = \frac{1}{\Delta R_V} \quad (39)$$

$$G' = \frac{G_V}{A_{KF}} \quad [G'] = \frac{S}{\text{mm}^2} \quad (40)$$

Der flächenbezogene Leitwert  $G'$  wird als Parameter für die Kontaktflächen  $A_{KF}$  im numerischen Berechnungsmodell benötigt und entspricht dem Kehrwert von  $\Delta R_V$  bezogen auf die jeweils kontaktierte Fläche  $A_{KF}$  (Bild 7.18). Diese kontaktierte Fläche  $A_{KF}$  ist abhängig von den verwendeten Fügeelementen und den Stromschienen (mit und ohne Bohrung). Die

mechanische Spannung  $\sigma$  auf der Kontaktfläche  $A_{KF}$  wurde mit der gemessenen Kontaktkraft  $F_K$  (Bild 7.17) und den Abmessungen der Kontaktfläche für die untersuchte Verbindung berechnet (Gl. (41)).

$$\sigma = \frac{F_V}{A_K} \quad (41)$$

für  $A_{K,OB}, A_{K,B}, A_{K,(OFF)}$   
mit  $A_{K,(OFF)} = A_{K,(OFF),\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}} = 670 \text{ mm}^2$  und  
 $A_{K,(OFF)} = A_{ers} = 541 \text{ mm}^2$

Für die Verbindungen mit zusätzlichen Stahlelementen und homogener Verteilung der mechanischen Spannung ist der Wert der Differenz  $\Delta R_V$  ähnlich (Tabelle 7.7). Für Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen ist das  $\Delta R_V$  abhängig vom berechneten idealen Gütefaktor  $k_{u,ideal}$ . Dieser Wert ändert sich mit den Abmessungen der Kontaktfläche  $A_{K,(OFF)}$  (Gl. (31)). Für den Flächeninhalt der Ersatzquerschnittsfläche  $A_{ers}$  (Kapitel 7.1.1) und den Flächeninhalt für eine Kontaktfläche mit einer mechanischen Spannung  $\sigma \geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}$   $A_{K,(OFF),\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}}$  (Tabelle 7.5, Tabelle 7.7). Das  $\Delta R_V$  wurde als flächenbezogener Leitwert  $G'$  im selben Diagramm abhängig von der mittleren mechanischen Spannung  $\sigma$  dargestellt (Bild 7.19).

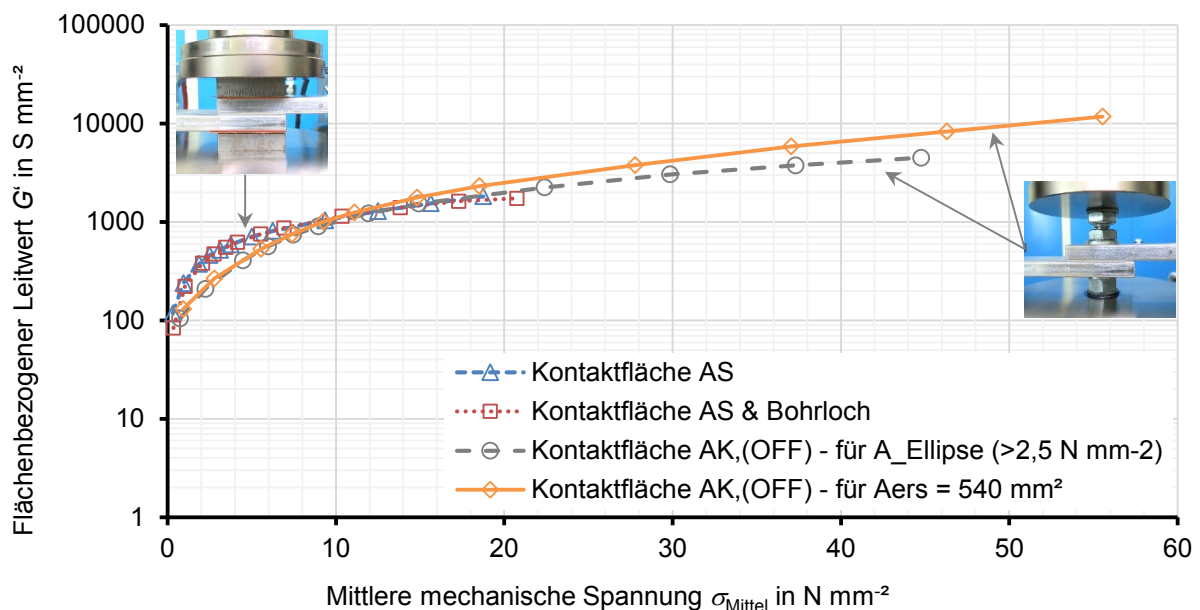


Bild 7.19: Flächenbezogener Leitwert  $G'$  für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit einer scheinbaren Kontaktfläche von  $A_s = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  und unterschiedlich kontaktierten Flächen  $A_{KF}$

Die Werte von  $G'$  abhängig von der mechanischen Spannung sind ähnlich. Die Differenz zwischen den Werten von  $G'$  für die modellierte Kontaktfläche  $A_{ers}$  ist bei mechanischen Spannungen von  $\sigma = 20 \text{ N mm}^{-2}$ , bezogen auf die Werte für Verbindungen mit Stahlelementen, höher. Das deutet darauf hin, dass die tatsächlich mechanisch kontaktierte und stromdurchflossene Kontaktfläche größer ist als  $A_{ers}$ . Für die ellipsenförmige Kontaktfläche  $A_{K,(OFF),\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}}$  ist die Differenz zu den Werten für Verbindungen mit Stahlelementen geringer.

Komplexes numerisches Berechnungsmodell einer Schraubenverbindung mit Stromschienen

Bei den experimentellen Untersuchungen zur mechanischen Spannungsverteilung in der Trennfuge zwischen den Stromschienen wurden Maximalwerte von  $\sigma > 130 \text{ N mm}^{-2}$  bei einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  bestimmt (Bild 7.13). Zum Parametrisieren der Kontaktflächen im numerischen Berechnungsmodell (Bild 7.20) mussten flächenbezogene Leitwerte  $G'$  für diese hohen Werte der mechanischen Spannung ermittelt werden.

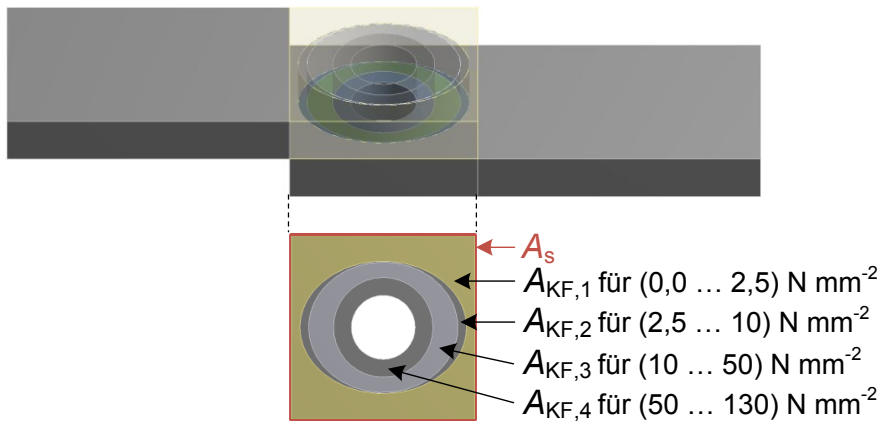


Bild 7.20: Numerisches Berechnungsmodell zum elektrischen Kontaktverhalten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen unter Berücksichtigung der mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  (schematisch)

Um die flächenbezogenen Leitwerte  $G'$  bestimmen zu können, wurden experimentelle Untersuchungen an Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit bearbeiteten Oberflächen durchgeführt. Die Oberfläche der Stromschienen wurde in einem definierten Bereich bis in einer Tiefe von  $50 \mu\text{m}$  spanabhebend bearbeitet. Es wurden mit diesem Verfahren Stromschienen mit vier unterschiedlich großen scheinbaren Kontaktflächen  $A_s$  der Abmessungen  $18,23 \text{ mm} \times 18,23 \text{ mm}$  bis  $29,79 \text{ mm} \times 29,79 \text{ mm}$  hergestellt (Bild 7.21).

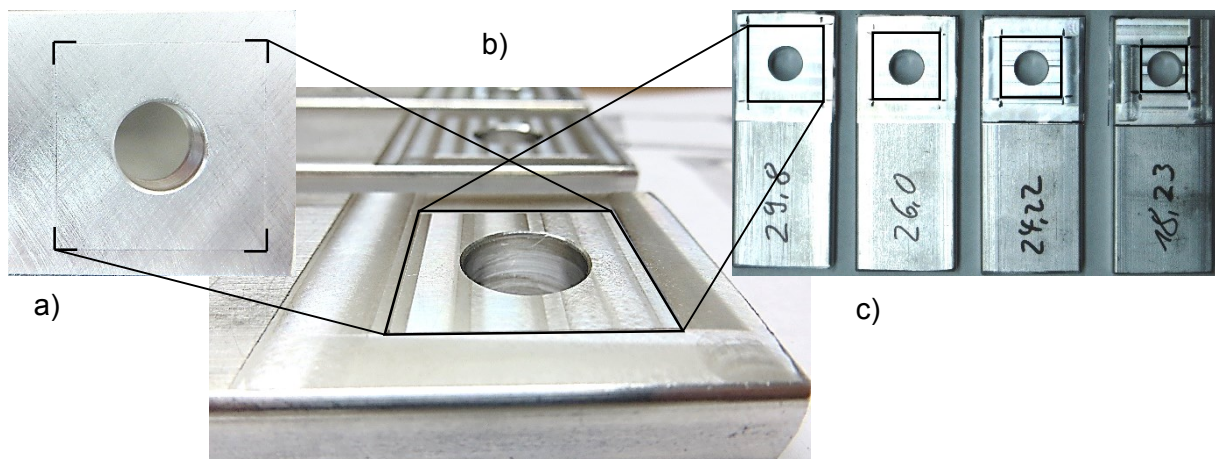


Bild 7.21: Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit spanabhebend bearbeiteter Oberfläche.  
a) Mit Stahldrahtbürste gereinigte Kontaktfläche, b) Kontaktfläche vor der abrasiven Vorbehandlung, c) Verkleinerte scheinbare Kontaktflächen  $A_s$

Für Verbindungen mit diesen Stromschienen wurden der ideale Gütefaktor  $k_{u,ideal}$  numerisch berechnet und in experimentellen Untersuchungen der Gütefaktor  $k_{u,real}$  bestimmt. Die Versuche wurden mit dem Versuchsaufbau (Bild 7.16) an ethanolgereinigten und gebürsteten Kontaktflächen der Stromschienen (siehe Kapitel 6.3) durchgeführt. Für die Verbindungen mit den unterschiedlichen Abmessungen der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  wurden die flächenbezogenen Leitwerte  $G'$  (Gl. (36), Gl. (39), Gl. (40)), abhängig von der mittleren mechanischen Spannung, experimentell bestimmt (Bild 7.22).

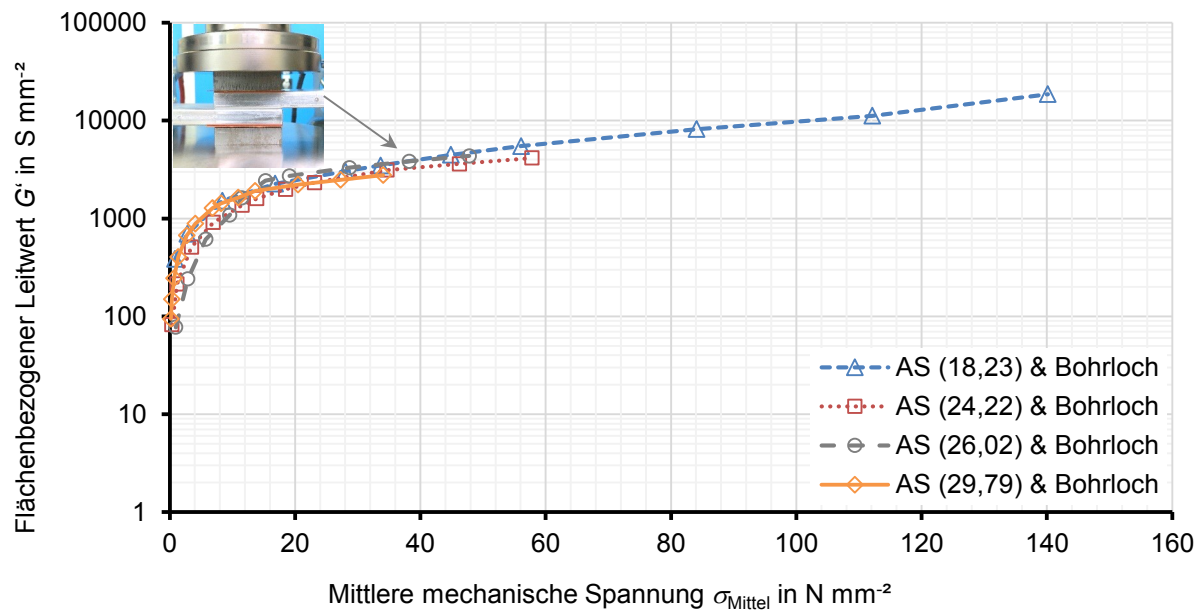


Bild 7.22: Flächenbezogener Leitwert  $G'$  abhängig von der mittleren mechanischen Spannung  $\sigma_{Mittel}$  für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und spanabhebend bearbeiteter Oberfläche zum Verkleinern der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$

Die Abweichung zwischen den Werten des flächenbezogenen Leitwerts  $G'$  ist für die Verbindungen mit den unterschiedlich großen scheinbaren Kontaktflächen  $A_s$  vernachlässigbar gering. Im numerischen Modell der Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 wurden die Abmessungen der Kontaktflächen ( $A_{KF,1} \dots A_{KF,4}$ ) (Bild 7.20) entsprechend der Messbereiche der Druckmessfolien für die mechanische Spannung (Bild 7.11) modelliert. Der Rand der Kontaktflächen  $A_{KF,n}$  entspricht den Abmessungen für den Minimalwert des jeweiligen Messbereichs der Druckmessfolien. Für die Kontaktflächen ( $A_{KF,2} \dots A_{KF,4}$ ) wurden ellipsenförmige Kontaktflächen mit den experimentell bestimmten Ellipsenhalbachsen (Tabelle 7.5) konzentrisch um die Bohrungen der Stromschienen nachgebildet.

Für jede dieser Kontaktflächen musste die mittlere mechanische Spannung  $\sigma_{Mittel}$  bestimmt und der dementsprechende flächenbezogene Leitwert  $G'$  aus (Bild 7.22) zugeordnet werden. Um die mittlere mechanische  $\sigma_{Mittel}$  zu bestimmen, wurden die Daten für die mechanische Spannung jedes mechanisch belasteten Flächenelementes der Druckmessfolien mit der optischen Analysesoftware  $A_{Software}$  (FDP-8018E von FUJIFILM) in dem Spannungsbereich zwischen (0,0 ... 170) N mm<sup>-2</sup> ausgewertet. Durch Summieren der Werte für die mechanische

Spannung je Flächenelement wurde eine mittlere mechanische Spannung entsprechend der Kontaktflächen  $A_{KF,n}$  definiert (Tabelle 7.8).

Tabelle 7.8: Vergleich der berechneten und experimentell bestimmten Gütefaktoren einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 für eine Kontaktkraft von  $F_K = 25$  kN

Modellierte Kontaktflächen (Bild 7.20) abhängig von der mechanischen Spannung (Bild 7.11, Tabelle 7.5)	Kontaktflächeninhalt	Mittlere mechanische Spannung	Mittlerer flächenbezogener Leitwert	Berechnungsmodell		Experiment (Bild 7.17)	
	$A_{KF}$ in mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{Mittel}}$ in N mm <sup>-2</sup>	$G'$ in S mm <sup>-2</sup>	$k_{u,(OFF),B}$	$R_{V,(OFF),B}$ in $\mu\Omega$	$k_{u,(OFF),M}$	$R_{V,(OFF),M}$ in $\mu\Omega$
$A_{KF,1}$ für (0,0 N mm <sup>-2</sup> ... 2,5 N mm <sup>-2</sup> )	776	1,6	0	1,05	2,97	1,03	2,91
$A_{KF,2}$ für (2,5 N mm <sup>-2</sup> ... 10 N mm <sup>-2</sup> )	96	6,3	1200				
$A_{KF,3}$ für (10 N mm <sup>-2</sup> ... 50 N mm <sup>-2</sup> )	357	27,1	2980				
$A_{KF,4}$ für (50 N mm <sup>-2</sup> ... 130 N mm <sup>-2</sup> )	216	75,8	7400				

Die Kontaktfläche  $A_{KF,1}$  (Bild 7.20) wurde als elektrisch isolierend mit einem flächenbezogenen Leitwert von  $G' = 0,0$  S mm<sup>-2</sup> (Tabelle 7.8) modelliert. Die sehr geringen Werte der mechanischen Spannung, die nur auf einem Teil dieser Fläche (Bild 7.11 a)) bestimmt wurden, liegen im Bereich der Messunsicherheit der Druckmessfolien. Der sehr geringe Anteil des Stromes, der über diese Kontaktfläche führen könnte, wurde im Berechnungsmodell vernachlässigt.

Durch das Parametrisieren der Kontaktflächen mit den unterschiedlichen flächenbezogenen Leitwerten  $G'$  wurde die Stromdichteverteilung abhängig von der mechanischen Spannung an die Realität angepasst. Im Vergleich zum experimentell ermittelten  $k_{u,(OFF),M} = 1,03$  wurde mit dem numerischen Berechnungsmodell ein Gütefaktor von  $k_{u,(OFF),B} = 1,05$  bestimmt. Die Differenz zwischen den Werten ist gering und könnte wahrscheinlich durch weitere modellierte Kontaktflächen reduziert werden. Zusammen mit den Aussagen zur Darstellung (Bild 7.19) ist anzunehmen, dass bei einer Schraubenverbindung ohne federnden Fügeelemente im System M12 (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5 (A) H14 eine makroskopisch elektrisch wirksame Fläche mit einem Flächeninhalt von  $A_{K,(OFF),\geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}} = 670 \text{ mm}^2$  entsteht. Dies gilt entsprechend der Untersuchungen zu Schraubenverbindungen mit einer Kontaktkraft von  $F_K = 25$  kN und Stromschienen, deren Kontaktfläche mit Ethanol gereinigt und mit einer Stahldrahtbürste vorbehandelt wurden.

## 7.2 Untersuchungen zum Langzeitverhalten

Das Altern von stromführenden Schraubenverbindungen durch den Abbau der Kontaktkraft wurde an unbeschichteten Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen (Kapitel 6.1) experimentell untersucht. Es wurden Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente ((OFF) - Kapitel 6.2.1) und Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) montiert (Tabelle 7.9).

Tabelle 7.9: Experimentelle Untersuchungen zum Kraftabbau an Schraubenverbindungen abhängig von den Fügeelementen und des Stromschienenwerkstoffs

Material [N4] EN AW-	Schienen- querschnitt	Konstante Oberflächentemperatur der Verbindungen $\vartheta_v$ in °C				
		80 °C	90 °C	115 °C	140 °C	160 °C
		Homologe Temperatur* für ( $\vartheta_{E,Al\ 99,5(A)} = 651,5\text{ °C}$ )**				
		0,38	0,39	0,42	0,45	0,47
Al 99,5(A) H14	40 x 10	(OFF / MFF) <sup>20</sup>	–	MFF	MFF	–
Al MgSi(B)-T7	40 x 10	–	–	MFF	MFF	MFF
Al MgSi(B)-T6	50 x 10	–	–	–	OFF	–
Al Mn0,5Mg0,5	50 x 10	–	–	–	OFF	–
Al 99,7	50 x 10	–	OFF	–	–	–

\* Die homologe Temperatur ist das Verhältnis aus der betrachteten absoluten Temperatur  $T$  in Kelvin zur absoluten Schmelztemperatur des Werkstoffs  $T_s$  in Kelvin

\*\* Mittelwert der Temperaturen für den Erstarrungsbereich von Al 99,5(A) (Tabelle 2.2). Der Erstarrungsbereich von Al MgSi(B) liegt bei niedrigeren Werten der Temperatur.

Je Werkstoff-Temperatur-Kombination wurde ein separater Versuch mit zehn stromführenden Schraubenverbindungen (Kapitel 6.3, Bild 6.5) in Betrieb genommen. Die dauerhaft an diesen Verbindungen eingestellte Betriebstemperatur wurde entsprechend der gültigen Standards für stromführende Verbindungen gewählt (Tabelle 2.6). Zudem wurden basierend auf den physikalisch zum Kraftabbau führenden Mechanismen ausgewählte Temperaturen berücksichtigt (Kapitel 4.2). Der physikalische Vorgang des Kriechens ist abhängig von der Temperatur und der mechanischen Beanspruchung des Werkstoffs in mehrere Kriechmechanismen unterteilt (Kapitel 4.2.3), [11], [56]. Nabarro-Herring-Kriechen sollte z. B. bei einer Temperatur von 80 °C nicht der dominierende Mechanismus sein, der zu einem signifikanten Kraftabbau in der Verbindung führt (Kapitel 4.2.3, Bild 4.3). Trotzdem liegen die Betriebstemperaturen ab 115 °C mit  $T/T_s \geq 0,4$  in einem Bereich, in dem Diffusionsprozesse und auch das energieintensivere Klettern von Stufenversetzungen als Elementarprozess thermisch aktiviert sind (Tabelle 4.4). Für eine viskoplastische Verformung der Werkstoffe sind damit die physikalischen Mechanismen dynamische Erholung, die dynamische primäre Rekristallisation und das Versetzungskriechen durch das Bewegen von Versetzungen möglich. Der Abbau der Kontaktkraft wird neben der Konstruktion der Verbindung im Wesentlichen von der Zeitstandfestigkeit des Aluminiumwerkstoffs beeinflusst. Bei Werkstoffen mit einer hohen Kriechbeständigkeit ist der Kraftabbau geringer. In dem

<sup>20</sup> Jeweils fünf Verbindungen für die Untersuchungen mit verschiedenen Fügeelementen



geförderten Projekt „ALLEE“<sup>21</sup> wurde an der Entwicklung zeitstandstabiler Aluminiumlegierungen gearbeitet. Bei diesen Legierungen war es das Ziel, die Kriechbeständigkeit zu erhöhen ohne die elektrische Leitfähigkeit zu verringern. Dafür wurden verschiedene Legierungen mit dispersoidbildenden Fremdatomen untersucht. Diese thermisch stabilen, dispersionshärtenden Phasen, die beim Homogenisierungsglühen (Bild 2.2) in die Aluminiummatrix eingelagert werden, sollen die Kriechbeständigkeit verbessern und damit den Abbau der Kontaktkraft verringern. [13], [14], [15]

### 7.2.1 Zeit- und temperaturabhängige Härte des Aluminiums

Als Indikator für Veränderungen im Gefüge des Werkstoffs, durch eine thermische Beanspruchung, wurde die Härte in HV10 nach Vickers für die Aluminiumwerkstoffe ermittelt [N29]. Die Härtemessung dient damit auch zum Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe [57]. Die Messungen<sup>22</sup> erfolgten für den Anlieferungszustand (AZ) und entsprechend der thermischen Belastung in den Langzeitversuchen (Kapitel 7) nach einer entsprechenden Warmlagerungszeit der Proben im Wärmeschrank (Bild 7.23, Bild 7.24).

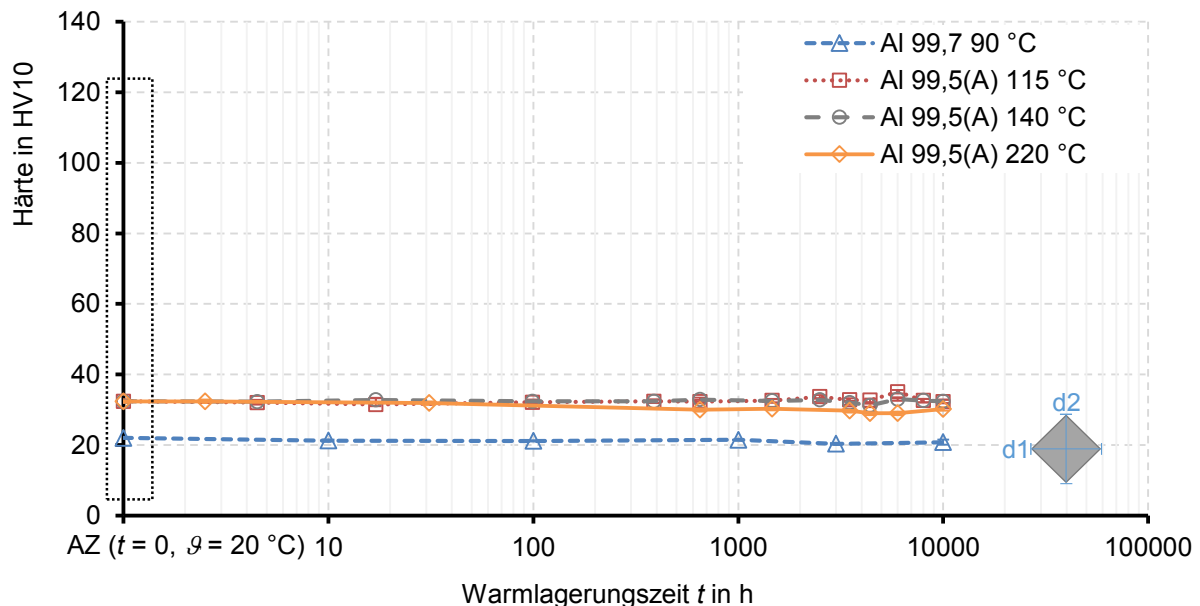


Bild 7.23: Härte für die technisch reinen Aluminiumwerkstoffe Al 99,5(A) H14 und Al 99,7 abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen

Es wurden für jede Probe fünf Prüfeindrücke ausgewertet und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung dargestellt. Die technisch reinen Aluminiumwerkstoffe Al 99,5(A) H14 und Al 99,7 haben eine sehr geringe Härte von etwa (20 und 30) HV10 (Bild 7.23). Im Vergleich dazu sind die Härtewerte des ausscheidungsgehärteten Al MgSi und des Al MgSi(B)-T6 im Anlieferungszustand und den ersten Betriebsstunden bei erhöhten

<sup>21</sup> Förderinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“, Themenfeld Übertragungs- und Verteilungstechniken, Verbundantrag: Langzeitstabile Aluminiumlegierungen für elektrische Verbindungen – ALLEE, Förderkennzeichen: 03EK3538, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung

<sup>22</sup> Härtemessung in HV10:

Institut für Werkstoffwissenschaften, IfWW, TU Dresden (Al 99,5(A), Al MgSi)

Lehrstuhl für Werkstofftechnik, LWT, Uni Rostock (Al 99,7, Al MgSi(B)-T6, Al Mn0,5Mg0,5)



Temperaturen mit 80 HV10 und 90 HV10 etwa dreimal so hoch (Bild 7.24).

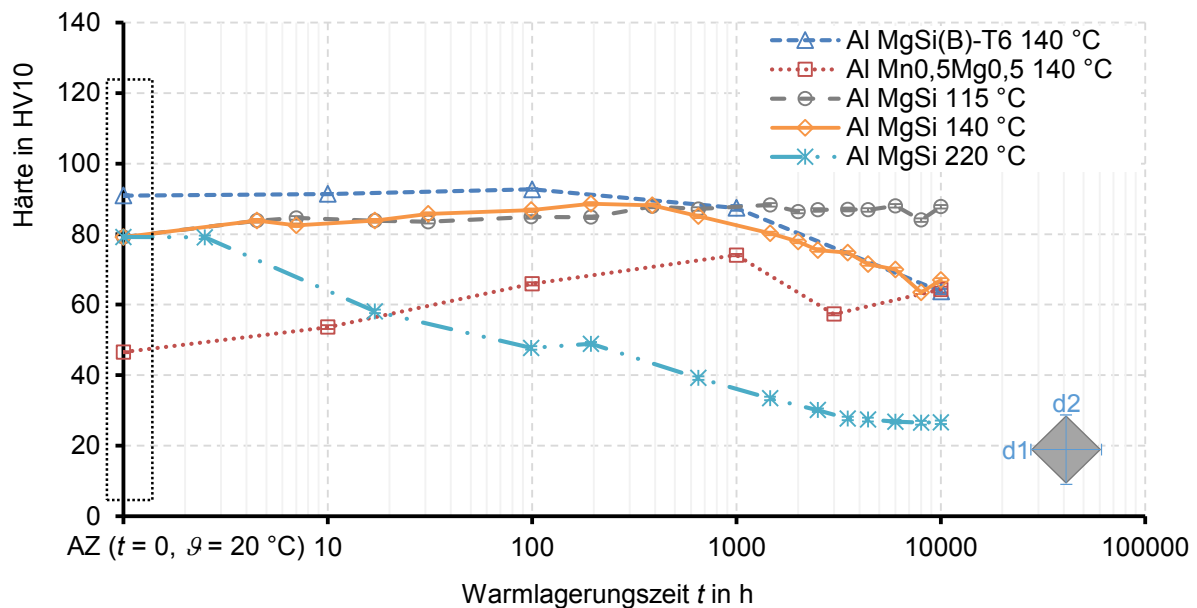


Bild 7.24: Härte für die Aluminiumlegierungen Al MgSi, Al MgSi(B) und Al Mn0,5Mg0,5 abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen

Bis zu einer Betriebszeit von 10.000 h wurden konstante Werte der Härte für Al 99,5(A) H14 bei Temperaturen bis 220 °C und für Al 99,7 bei einer von Temperatur 90 °C ermittelt (Bild 7.23). Bei einer Temperatur von 220 °C wäre im Vergleich zur homologen Temperatur von  $T/T_s \approx 0,4$  nach der Tammanschen Regel für reine Metalle die statische primäre Rekristallisation im Werkstoff (Tabelle 4.3) zu erwarten. Die Rekristallisation ist abhängig vom Umformgrad und führt nach einer Inkubationszeit mit Keimbildung zu einer signifikanten Werkstoffentfestigung [1]. Bei hartgezogenen Drähten aus Al 99,5(A) wird in der Literatur eine Temperatur von 175 °C für eine vollständige Entfestigung angegeben [2]. Die hier gemessenen Härtewerte an Al 99,5(A) H14 (Bild 7.23) haben sich bis zu einer Zeit von 10.000 h bei einer Temperatur von 220 °C nicht signifikant verändert. Es wird angenommen, dass die statische primäre Rekristallisation bis zu dieser Zeit nicht zu einer Entfestigung des Werkstoffs geführt hat.

Der Einfluss der thermischen Belastung auf die Härte der Werkstoffe mit Mg und Si als Hauptlegierungselemente ist signifikant (Bild 7.24). Die ausscheidungsgehärteten Aluminiumlegierungen mit Mg und Si überaltern bei Temperaturen nahe der Warmauslagerungstemperatur bei der Herstellung. Überaltert werden diese Halbzeuge in der Fertigung durch eine Wärmebehandlung bei einer Temperatur von (155 ... 190) °C für einige Stunden. [1]

Nach einem Maximum verringert sich die Härte ab einer Betriebszeit von etwa (300 bis 500) h bei einer Temperatur von 140 °C deutlich (Bild 7.24). Für die Proben, die bei einer Temperatur von 220 °C gelagert wurden, konnten bereits ab einer Warmlagerungszeit von 2,5 h geringere Härtewerte im Vergleich zum Anlieferungszustand gemessen werden. Durch das Vergrößern der ausgeschiedenen, härtenden Teilchen in der Aluminiummatrix verringert sich die Härte und der Werkstoff entfestigt. Das Wachsen der Teilchen ist abhängig von der Temperatur und der Zeit, sodass die höhere thermische Beanspruchung bei 220 °C früher zum Überaltern führt. Das Vergrößern der härtenden Teilchen hat dabei nicht nur einen Einfluss auf die

mechanischen Eigenschaften, sondern auch auf die elektrische Leitfähigkeit (Kapitel 7.2.2, Bild 7.25).

Das  $\text{Al Mn0,5Mg0,5}$  zählt zu den nicht aushärtbaren Legierungen. Die Härte hat sich trotzdem in den ersten 1.000 h von etwa 45 HV10 im Anlieferungszustand auf Werte bis 75 HV10 erhöht. Dies ist wahrscheinlich auf den hier angewendeten Herstellungsprozess des Strangpressens zurückzuführen. Der Werkstoff wurde, wie die Aluminiumlegierungen mit Mg- und Si-Hauptlegierungselementen, homogenisierungsgeglüht und stranggepresst. Da das  $\text{Al Mn0,5Mg0,5}$  neben Mn und Mg auch Si enthält, ist anzunehmen, dass aus dem übersättigten Mischkristall nach dem Abschrecken an der Strangpresse härtende Teilchen ausgeschieden wurden. Diese haben zu einer Verfestigung und einem Erhöhen der Härte in den ersten Betriebsstunden geführt. Nach einem Härtemaximum für eine Betriebszeit von 1.000 h bei 140 °C verringerte sich die Härte auf einen Wert von 60 HV 10. Dieser Wert war damit trotzdem noch höher als im Anlieferungszustand. Für das  $\text{Al Mn0,5Mg0,5}$  konnte ebenfalls eine Korrelation zwischen der Härte und der elektrischen Leitfähigkeit hergestellt werden (Bild 7.25).

## 7.2.2 Zeit- und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums

Die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Werkstoffe wurde aus den bei Raumtemperatur gemessenen Materialwiderständen und den geometrischen Abmessungen an zylindrischen Proben, sowie an den untersuchten Stromschienen bestimmt. Die zylindrischen Proben mit einer Länge von 100 mm wurden aus Stromschienen mit einer Höhe von 10 mm spanabhebend hergestellt. Der Durchmesser der bearbeiteten Rundproben (9,83 ... 9,92) mm wurde nach der mechanischen Bearbeitung an jeder Probe gemessen. An diesen Proben wurde der Materialwiderstand auf einer Länge von 30 mm bestimmt (Bild 7.25).

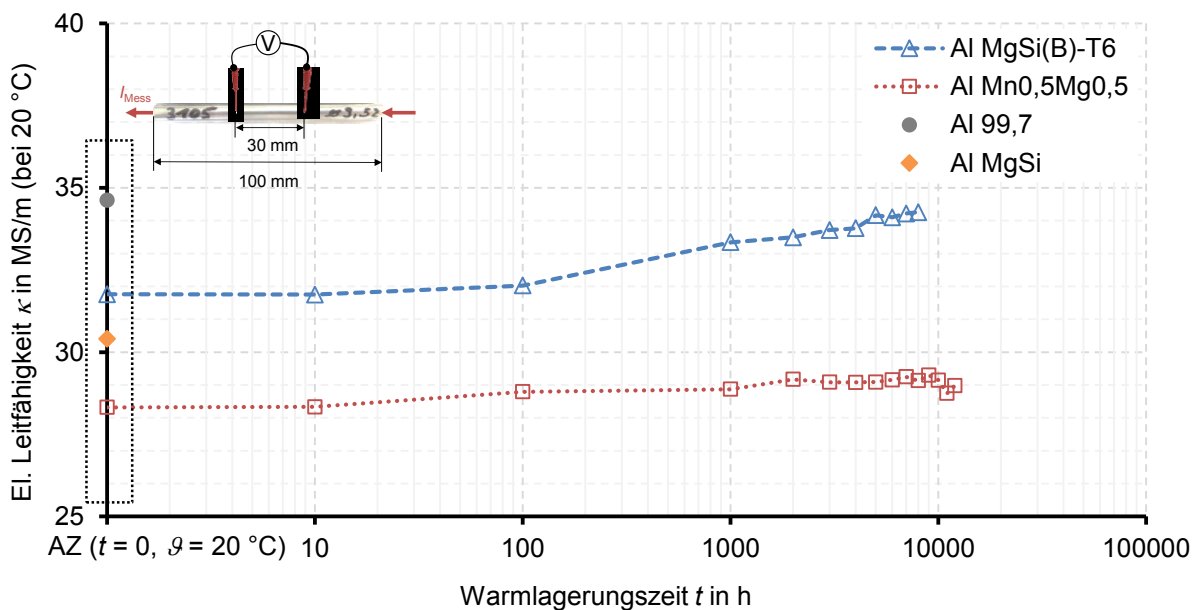


Bild 7.25: Elektrische Leitfähigkeit von Al 99,7 und Al MgSi im Anlieferungszustand und der Legierungen Al MgSi(B)-T6 und Al Mn0,5Mg0,5 abhängig von der Warmlagerungszeit bei einer Temperatur von 140 °C im Wärmeschrank

Die Materialwiderstände wurden nach der Vier-Leiter-Messmethode mit einem Mikroohmmeter<sup>23</sup> gemessen. Die Temperatur wurde an den Proben mit einem Handtemperaturmessgerät<sup>24</sup> bestimmt und die Materialwiderstände auf 20 °C bezogen. Die elektrische Leitfähigkeit wurde im Anlieferungszustand (AZ) und nach der Warmlagerung, bei verschiedenen Temperaturen im Wärmeschrank abhängig von der Zeit, bestimmt (Bild 7.25, Bild 7.26). Für die technisch reinen Aluminiumwerkstoffe Al 99,5(A) und Al 99,7 ist im Anlieferungszustand die elektrische Leitfähigkeit mit etwa 35 MS/m höher als bei den legierten Aluminiumwerkstoffen. Nach einer Warmlagerungszeit bei Temperaturen bis 140 °C hat sich die elektrische Leitfähigkeit des Al 99,5(A) nicht signifikant geändert (Bild 7.26). Zusammen mit den Messwerten für die Härte (Kapitel 7.2.1) deutet das ebenfalls nicht auf eine starke Änderung des Gefüges durch die statische primäre Rekristallisation hin. Vollständig rekristallisiertes Al 99,5(A) im weichgeglühten Zustand hat eine höhere elektrische Leitfähigkeit als Al 99,5(A) im kaltverfestigten Zustand [1].

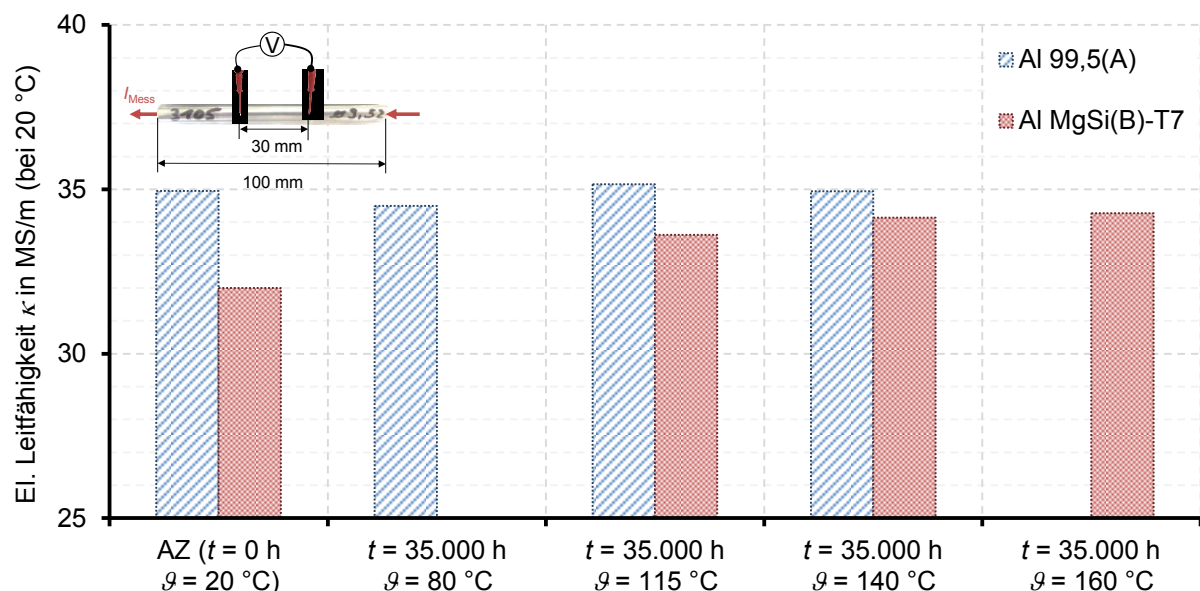


Bild 7.26: Elektrische Leitfähigkeit von Al 99,5(A) H14 und Al MgSi(B)-T7 im Anlieferungszustand und abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen im Wärmeschrank

Die elektrische Leitfähigkeit der Aluminiumlegierungen ist durch die Mischkristallverfestigung und Ausscheidungshärtung beeinflusst. Die Werte für die hier untersuchten Legierungen sind geringer als bei den technisch reinen Werkstoffen. Die Legierung Al Mn0,5Mg0,5 hatte mit einem  $\kappa \approx 28,3$  MS/m den geringsten Wert (Bild 7.25). Der Einfluss der nachträglichen Erwärmung auf eine Betriebstemperatur von 140 °C führte zu einer Veränderung der Werkstoffhärte und auch der elektrischen Leitfähigkeit. Durch das Ausscheiden von Mg und Si aus dem übersättigten Mischkristall hat sich die elektrische Leitfähigkeit auf einen Wert von etwa  $\kappa \approx 29$  MS/m erhöht.

<sup>23</sup> Mikroohmmeter: Typ LoRe®, Firma Werner Industrielle Elektronik

<sup>24</sup> Temperaturmessgerät mit Fühler: Typ Almemo, Firma Ahlborn

Die elektrische Leitfähigkeit der Al-Mg-Si-Legierungen ist abhängig vom Zustand nach der Wärmebehandlung in der Fertigung und von den weiteren Legierungselementen. Für das Al MgSi(B) wurden in beiden Wärmebehandlungszuständen T6 und T7 eine elektrische Leitfähigkeit von etwa 32 MS/m im Anlieferungszustand bestimmt. Durch die hohen Temperaturen vergrößern sich die Ausscheidungen mit der Zeit und die Werkstoffe überaltern. Wenige große Teilchen führen dabei zu einer höheren elektrischen Leitfähigkeit im Vergleich zu vielen kleinen, homogen verteilten Teilchen. Dadurch wird die elektrische Leitfähigkeit während des Entfestigens höher. Die elektrische Leitfähigkeit wurde dabei nicht nur bei Mg-Si-Legierungen im Zustand mit der höchsten mechanischen Festigkeit (T6) (Bild 7.25), sondern auch im herstellungsbedingt überalterten Zustand (T7) (Bild 7.26) beobachtet.

### 7.2.3 Versuchsergebnisse zum Langzeitverhalten

Die Kontaktkraft  $F_K$  wurde abhängig von der Zeit und der Temperatur in Langzeitversuchen bestimmt und der Mittelwert, sowie die Spannweite je Versuchsreihe ermittelt. Es wurden die Gütefaktoren  $k_u$  (Gl. (16)) mit den Materialwiderständen der entsprechenden Legierungen unter Berücksichtigung der zeit- und temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit (Kapitel 7.2.2) berechnet (Bild 7.27 ... Bild 7.29).

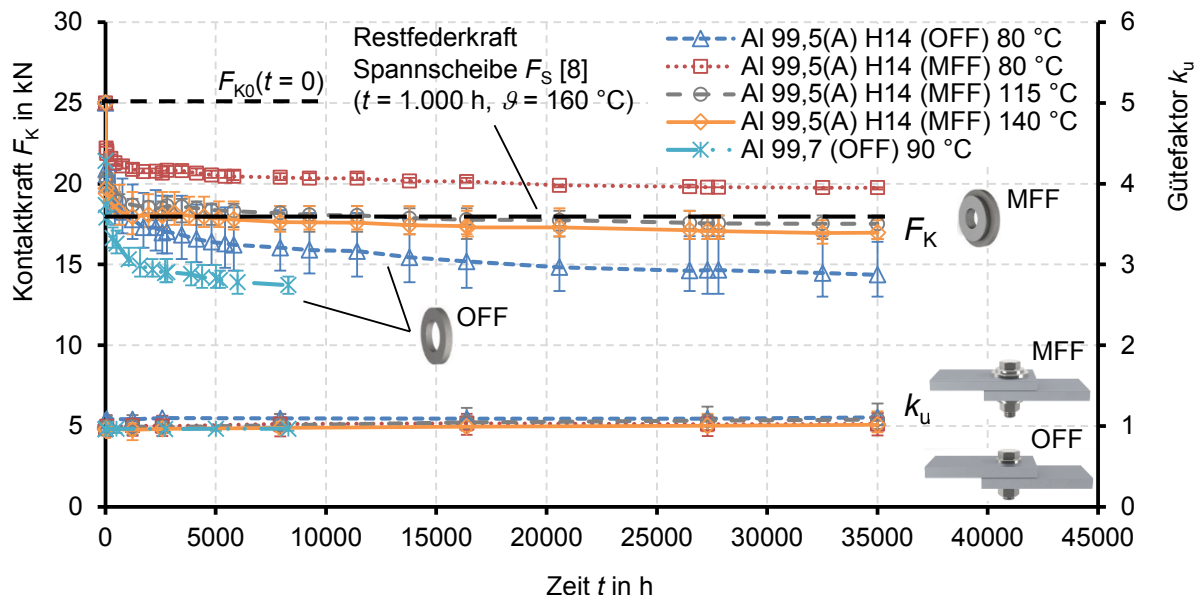


Bild 7.27: Kontaktkraft  $F_K$  und Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen (OFF - Kapitel 6.2.1, MFF - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al 99,5(A) und Al 99,7 abhängig von der Zeit und Temperatur

Nach der Montage der Verbindungen hat sich bei allen Aluminiumwerkstoffen bereits bei Raumtemperatur von etwa 25 °C die Kontaktkraft durch Setzen in den Trennfugen auf Werte von etwa  $F_K = (21,5 \dots 24) \text{ kN}$  abgebaut. Das Minimum der Kontaktkraft wurde an Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,7 bestimmt (Bild 7.27). Für die legierten Werkstoffe Al MgSi(B)-T6 und Al Mn0,5Mg0,5 wurde der geringste Kraftabbau durch Setzen ermittelt (Bild 7.29).

Trotz zusätzlicher Trennfugen bei Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) hat sich die mittlere Kontaktkraft durch die federnde Wirkung

der Spannscheiben für das technisch reine Al 99,5(A) H14 und das legierte Al MgSi(B)-T7 auf einen identischen Wert der Kontaktkraft von etwa  $F_K = 23$  kN abgebaut (Bild 7.27, Bild 7.28). Für diese Art der Spannscheiben aus Federstahl wurde nach einer Warmlagerung für 1.000 h bei 160 °C eine Restfederkraft von  $F_S = 18$  kN experimentell bestimmt und unterscheidet sich vernachlässigbar gering zum Neuzustand (Kapitel 6.2.2) [8].

Im Langzeitbetrieb ist für Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus Al 99,5(A) und Al MgSi(B)-T7 der Einfluss der Betriebstemperatur auf den Kraftabbau sehr deutlich zu sehen (Bild 7.27 und Bild 7.28). Bei Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) reduzierte sich die Kontaktkraft auf Werte von etwa  $F_K = 20$  kN bei 80 °C,  $F_K = 17$  kN bei 115 °C und  $F_K = 16$  kN bei 140 °C nach einer Betriebszeit von 35.000 h (Bild 7.27). Im Vergleich dazu sind die Werte der Kontaktkraft bei gleicher Betriebstemperatur für Schraubenverbindungen (MFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 ähnlich. Die mittlere Kontaktkraft hat sich bei den Verbindungen und einer Temperatur von 115 °C auf  $F_K = 17$  kN, bei 140 °C auf  $F_K = 16$  kN und für 160 °C auf  $F_K = 15$  kN reduziert (Bild 7.28).

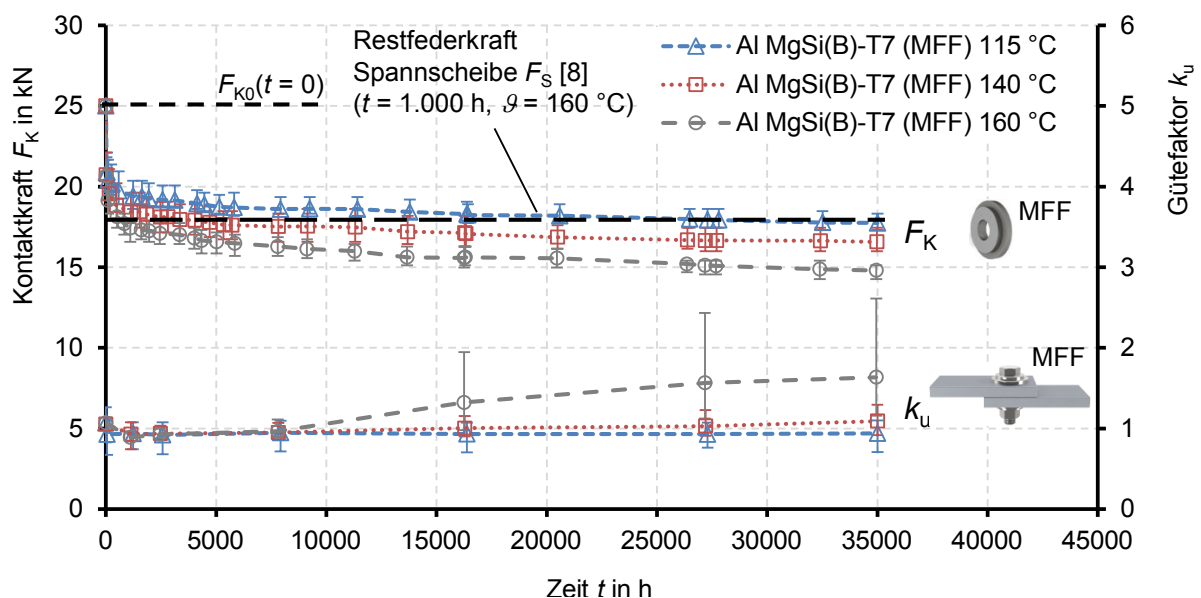


Bild 7.28: Kontaktkraft  $F_K$  und Gütefaktor  $k_u$  für Schraubenverbindungen (MFF) (Kapitel 6.2.2) mit Stromschienen aus Al MgSi(B) im Zustand T7 abhängig von der Zeit und der Betriebstemperatur

Durch die federnden Spannscheiben wird für einen relativ großen Bereich der Dehnung eine annähernd konstante Kontaktkraft erzeugt. Dadurch wird auch bei einer viskoplastischen Verformung des Leiterwerkstoffs (Kapitel 4.2.3) der Kraftabbau deutlich reduziert.

Bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Unterlegscheiben der normalen Reihe [N24] ist der Kraftabbau größer (vgl. [8], [35]). Die Kontaktkraft hat sich bei Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) bei einer Temperatur von 80 °C auf einen mittleren Wert von  $F_K = 14$  kN nach 35.000 h abgebaut (Bild 7.27). Im direkten Vergleich zu Verbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) ist die mittlere Kontaktkraft mit  $F_K = 20$  kN deutlich höher. Beim technisch reinen Al 99,7 wurde bei einer thermischen Beanspruchung von 90 °C dieser Wert mit einer mittleren Kontaktkraft von  $F_K = 13$  kN bereits nach 8.000 h

sogar noch unterschritten (Bild 7.27). Eine Temperaturdifferenz von nur 10 K im Betrieb führt bei annähernd gleichen Materialeigenschaften der technisch reinen Aluminiumwerkstoffe zu einem signifikant höheren Kraftabbau in den Schraubenverbindungen.

Das Entfestigen des Al MgSi(B) ab einer Temperatur von 140 °C durch Vergrößern der Ausscheidungen (Bild 7.24) ist nicht im Verhalten beim Kraftabbau von Verbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF), sondern nur bei Verbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) zu beobachten. An Schraubenverbindungen (OFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T6 ist der Abbau der Kontaktkraft am größten. Die mittlere Kontaktkraft nähert sich nach 16.000 h noch keinem stationären Wert an und verringert sich weiter stetig (Bild 7.29).

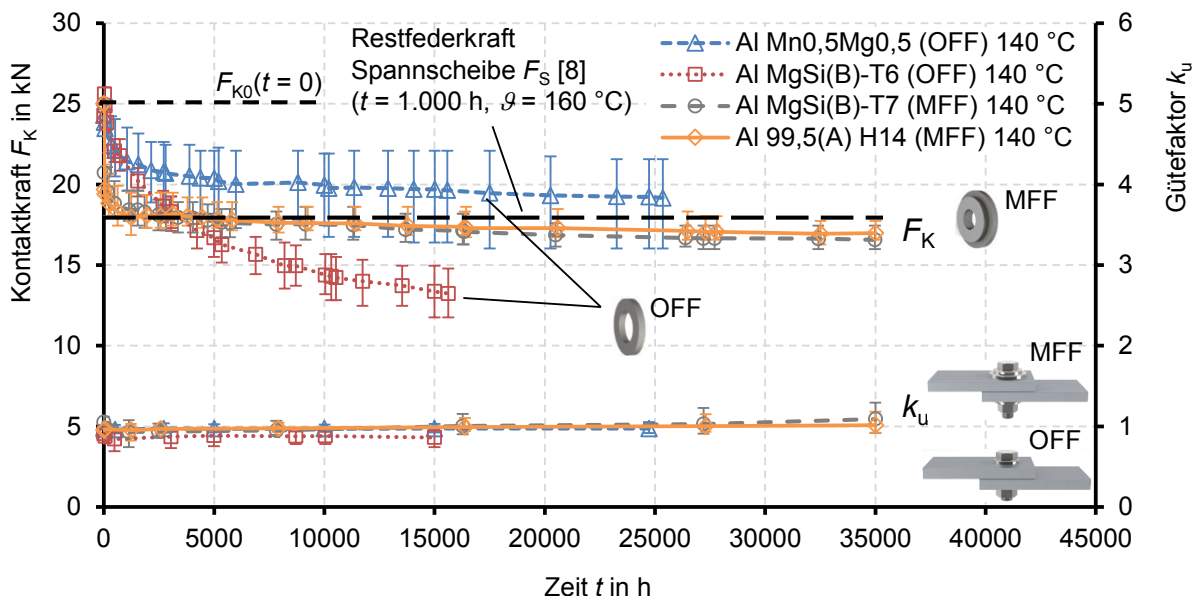


Bild 7.29: Kontaktkraft  $F_K$  und Gütefaktor  $k_u$  für Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen (OFF - Kapitel 6.2.1, MFF - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen abhängig von der Zeit bei einer Temperatur von 140 °C

Der geringste Kraftabbau wurde für die naturharte Aluminiumlegierung Al Mn0,5Mg0,5 ermittelt. Die mittlere Kontaktkraft von 19 kN bei 140 °C nach 25.000 h ist sogar höher als für die Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus den Aluminiumwerkstoffen Al 99,5(A) und Al MgSi(B) (Bild 7.29). Zwei der zehn Verbindungen in diesem Hochstromkreis führten allerdings zu großen Spannweiten im Vergleich zu den anderen Werkstoffen. Nach Abschluss der Langzeitversuche werden deshalb die Restverbindungskräfte bestimmt und damit diese beiden Kraftmesseinrichtungen überprüft (vgl. [35]).

Für die technisch reinen Aluminiumwerkstoffe Al 99,5(A) und Al 99,7, sowie für die naturharte Legierung Al Mn0,5Mg0,5 nähern sich die Werte der mittleren Kontaktkraft einem nahezu stationären Wert an. Dies ist auf die Verteilung der mechanischen Spannung im Bereich des Druckkegels der Schraube-Mutter-Verbindung zurückzuführen. Durch die viskoplastische Verformung des Aluminiums und der Spannungsrelaxation im Betrieb stellt sich eine homogenere mechanische Spannungsverteilung in den Trennfugen der Schraubenverbindung ein. Dadurch reduzieren sich die Orte lokal hoher mechanischer Spannung an den



mikroskopisch kleinen Berührungsflächen der Werkstoffe und im Vergleich zu den ersten Betriebsstunden wird damit die Kriechgeschwindigkeit geringer. Zusätzlich reduziert sich durch die Kriechverformung der Stromschienen die in das System eingeprägte mechanische Spannung durch das Verkürzen der elastisch gedehnten Schraube (Kapitel 4.2.3).

Die Gütefaktoren  $k_u$  der gealterten Verbindungen haben sich in Bezug zum montierten Zustand, bis auf Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 bei einer Temperatur von 160 °C, nicht signifikant geändert (Bild 7.27 ... Bild 7.29). Die Gütefaktoren waren bei Schraubenverbindungen (MFF) im Vergleich zu Schraubenverbindungen (OFF) aufgrund der homogeneren mechanischen Spannungsverteilung auf der Kontaktfläche  $A_s$  etwas geringer (Bild 7.27, Bild 7.29, Kapitel 7.2.5 - Bild 7.34). Durch die Spannscheibe wird ein größerer Anteil der Kontaktkraft auf einer größeren Fläche in die Verbindung eingepreßt (vgl. zwischen Schraubenverbindungen mit kleiner Unterlegscheibe und Spannscheibe - Tabelle A. 3). Dadurch wird der Druckkegel breiter und die mechanische Spannung um das Bohrloch homogener verteilt. Infolgedessen formiert sich eine größere Anzahl an Mikrokontakten, die aber durch die geringere mechanische Spannung kleinflächiger sind. Fremd- und Oxidschichten werden dadurch im Vergleich zu Verbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) weniger stark beim Montieren aufgebrochen. Damit erklären sich auch die höheren Spannweiten für die Gütefaktoren  $k_u$  bei Schraubenverbindungen (MFF) bei kleineren Spannweiten für die mittlere Kontaktkraft  $F_K$ . Bei Schraubenverbindungen (OFF) ist die mechanische Spannungsverteilung inhomogen. Die Spannweite der Kontaktkraft  $F_K$  ist damit höher und die Spannweite der Gütefaktoren  $k_u$  geringer. In der Kontaktfläche  $A_s$  werden am Bohrlochrand mit hohen mechanischen Spannungen großflächige stromführende Mikrokontakte gebildet.

Das Langzeitverhalten der untersuchten Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 zeigte nach 35.000 h bei 160 °C erhöhte Verbindungswiderstände (Bild 7.28). Der mittlere Gütefaktor hat sich in dieser Zeit auf  $k_u = 1,6$  erhöht, obwohl sich die Kontaktkraft nur auf einen Wert von  $F_K = 15$  kN abgebaut hat. Der Maximalwert des Gütefaktors wurde mit  $k_u = 2,5$  bestimmt. Damit haben diese Verbindungen im normalen Betrieb eine höhere Temperatur im Vergleich zum homogen durchströmten Leiter und altern schneller. Die minimale Kontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN wurde mit einem Wert von  $F_K = 15$  kN noch nicht unterschritten (Kapitel 7.2.5). Mit dem gleichen Werkstoff wurden experimentelle Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) stromlos im Wärmeschränk bei einer Temperatur von 180 °C durchgeführt [80]. Die Verbindungen wurden bis zu einer Zeit von 5.000 h untersucht. In dieser Zeit wurde ein konstanter Gütefaktor von  $k_u = 1,0$  bestimmt [80].

Es wird vermutet, dass in den Langzeitversuchen an stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen in den Engstellen der Mikrokontakte lokal hohe Stromdichten zu einer zusätzlichen Erwärmung geführt haben. Durch die lokal hohen Temperaturen kommt es insbesondere an den mechanisch und elektrisch hoch belasteten Mikrokontakten zu einer verstärkten Alterung. Mikrobewegungen in der Trennfuge zwischen den Stromschienen, durch thermische Dehnung beim Erwärmen und Abkühlen des Hochstromkreises, kann es zu einer mechanischen Scherspannung an den Mikrokontakten kommen (vgl. Bild 4.7 b)). Dabei brechen die Mikrokontakte auf und kontaktieren auf bereits oxidierten Bereichen in der

Kontaktfläche  $A_s$  neu. Diese Fläche ist mit einer Aluminiumoxidschicht überzogen und damit elektrisch isolierend, sodass der Verbindungswiderstand sich deutlich erhöhen kann.

#### 7.2.4 Abschätzen der Restkontaktkraft

Um die Langzeitstabilität der Schraubenverbindungen abschätzen zu können wurden die experimentell bestimmten Werte der Kontaktkraft und die dazugehörigen Spannweiten (Kapitel 7.1) mit dem Extrapolationsverfahren nach Larson & Miller (Kapitel 4.2.4) ausgewertet. Die gemessenen Werte wurden, beginnend nach 50 h Betrieb betrachtet, um eine Überlagerung des Kraftabbaus mit Setzprozessen in den Trennfugen zwischen den Fügeelementen nicht zu bewerten. Entsprechend der Kombination aus Werkstoff, Fügeelementen und thermischer Beanspruchung erfolgt die Darstellung abhängig vom Larson-Miller-Parameter  $P'$  (Bild 7.30 ... Bild 7.32).

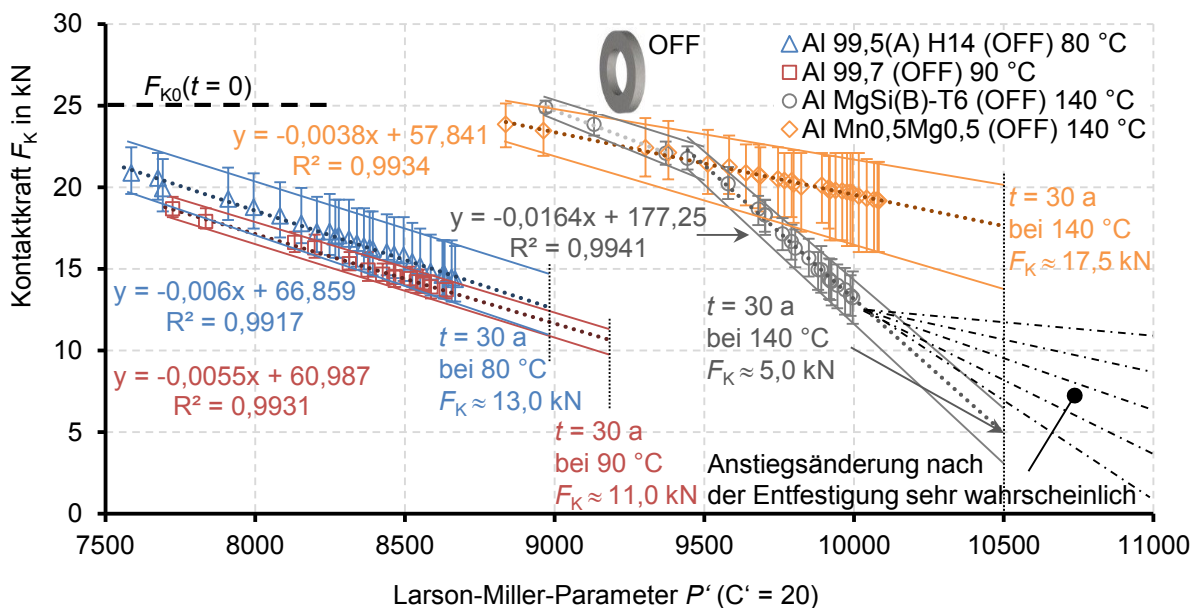


Bild 7.30: Kontaktkraft  $F_K$  von Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen abhängig vom Larson-Miller-Parameter  $P'$  bei verschiedenen Dauerbetriebstemperaturen; Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf der Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  farbcodiert entsprechend des untersuchten Aluminiumwerkstoffs.

Basierend auf den Ergebnissen der Messung wurden lineare Regressionsfunktionen bestimmt und zusammen mit dem entsprechenden Bestimmtheitsmaß  $R^2$  dargestellt. Je nach Betriebstemperatur erfolgt die Extrapolation der mittleren, sowie minimalen und maximalen Kontaktkraft auf eine Betriebszeit von  $t = 30$  Jahren. Die Extrapolation von Messwerten um ein vielfaches länger als die eigentliche Versuchszeit führt zu sehr großen Unsicherheitsbereichen. Es wird, z. B. für die Extrapolation von experimentellen Ergebnissen aus klassischen Kriechversuchen an Zugproben [N18], ein Faktor von maximal drei in der Zeit empfohlen (Kapitel 4.2.4), [11].

Bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) ist für die technisch reinen Werkstoffe Al 99,5(A) und Al 99,7, sowie für das Al Mn0,5Mg0,5 ein linearer Zusammenhang zwischen Kontaktkraft  $F_K$  und Larson-Miller-Parameter  $P'$  zu erkennen



(Bild 7.30). Für diese Versuche ist eine Extrapolation der Kontaktkraft mit der Annahme, dass keine weiteren physikalischen Mechanismen zu einem späteren Zeitpunkt aktiviert werden, möglich. Der Anstieg im Kraftabbau ist für das Al Mn<sub>0,5</sub>Mg<sub>0,5</sub> wesentlich geringer als bei den technisch reinen Aluminiumwerkstoffen mit einer geringeren thermischen Beanspruchung. Für das Al Mn<sub>0,5</sub>Mg<sub>0,5</sub> wurde eine mittlere Kontaktkraft von  $F_K = 18 \text{ kN}$  nach 30 Jahren bei 140 °C und für das Al 99,5(A) und Al 99,7 eine Kraft von  $F_K = (12,5 \text{ und } 10,5) \text{ kN}$  bestimmt.

Der Anstieg der Regressionsgeraden und damit auch der Kraftabbau sind für das Al 99,5(A) im Vergleich zum Al 99,7 nahezu identisch. Im Gegensatz dazu wurde für Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T6 bei einer Temperatur von 140 °C eine deutliche Änderung des Anstiegs der Regressionsgeraden beobachtet (Bild 7.30). Das Entfestigen des Werkstoffs durch das Vergrößern der Ausscheidungen (Bild 7.24) verändert nach einer Betriebszeit von 500 h bis 700 h den Kraftabbau. Der Anstieg erhöhte sich signifikant und beträgt etwa das Vierfache in Bezug zum Anstieg der Regressionsgerade bei der Legierung Al Mn<sub>0,5</sub>Mg<sub>0,5</sub>. Die mittlere Kontaktkraft würde basierend auf den extrapolierten Werten nach 30 Jahren nur noch  $F_K = 5 \text{ kN}$  betragen. Die Ergebnisse der Untersuchungen an dieser Legierung zeigen auch, dass Kurzzeittests bis zu einer Betriebszeit von 1.000 h nicht ausreichend sind um diesen Effekt zu sehen. Das Entfestigen des Werkstoffs ist nur bis zu stationären Mindestwerten der mechanischen Eigenschaften (vgl. der Härte von Al MgSi abhängig von der Temperatur - Bild 7.24), ähnlich zu denen von Al MgSi(B) vor einer Ausscheidungshärtung durch eine Wärmebehandlung, möglich. Sind diese Werte erreicht, wird sich der Kraftabbau an den Schraubenverbindungen verlangsamen. Damit verringert sich auch der Anstieg der Regressionsgeraden für den Kraftabbau und die extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren Betrieb wäre höher als der Wert von  $F_K = 5 \text{ kN}$  mit der überlagerten Entfestigung im Kraftabbau (Bild 7.30).

Der Anstieg der Regressionsgeraden von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) ist im Vergleich zu den Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) deutlich geringer (Bild 7.31, Bild 7.32).

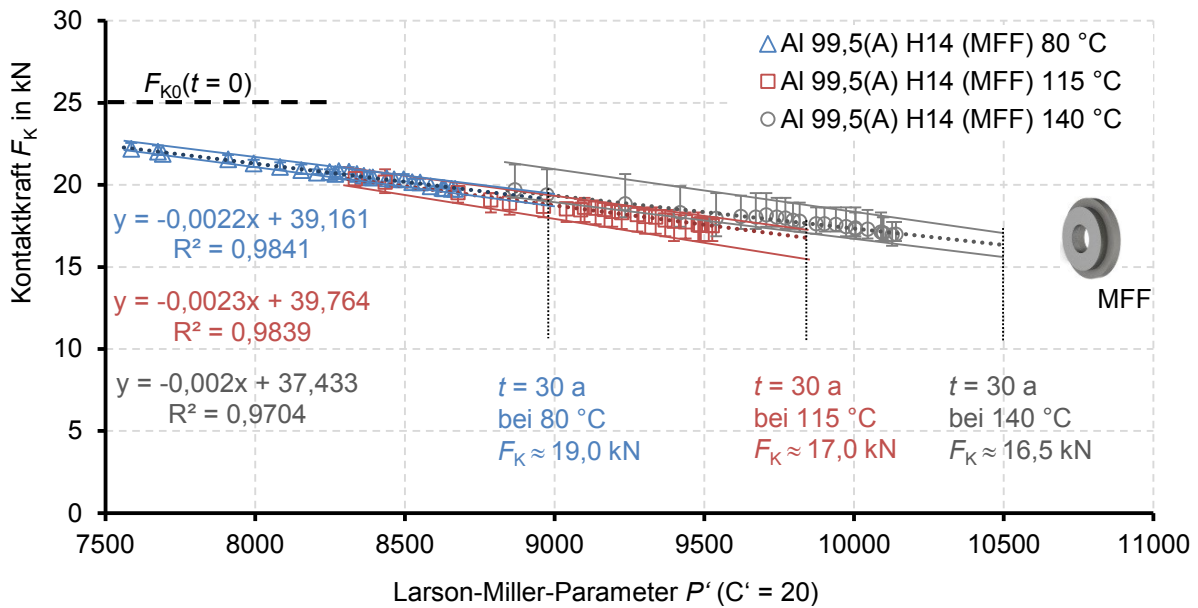


Bild 7.31: Kontaktkraft  $F_K$  von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 abhängig vom Larson-Miller-Parameter  $P'$  bei verschiedenen Dauerbetriebstemperaturen. Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf der Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  farbcodiert entsprechend der Temperatur.

Durch die Federwirkung der Spannscheiben wird der Kraftabbau signifikant reduziert. Für die Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) überlagern sich die Regressionsgeraden nahezu und die Anstiege sind ähnlich (Bild 7.31). Für die Extrapolation auf eine theoretisch unendlich lange Zeit würden dementsprechend unabhängig von der thermischen Beanspruchung ähnliche Werte der Kontaktkraft ermittelt. Die Geschwindigkeit der Kriechverformung des Aluminiums unterscheidet sich abhängig von der Temperatur bei diesen Versuchen und führt nach unterschiedlicher Betriebszeit zu den ermittelten Werten der Kontaktkraft. Die gleiche Kontaktkraft wird bei einer Temperatur von 80 °C erst zu einem späteren Zeitpunkt im Vergleich zur Beanspruchung bei einer Temperatur von 140 °C erreicht. Bei sehr langen Betriebszeiten werden die Verbindungen durch den Kraftabbau einen nahezu stationären Wert der Kontaktkraft erreichen. Die mechanische Spannung in den Trennfugen der Schraubenverbindungen wird durch die Kriechverformung der Stromschienen bis zu einem minimalen Wert reduziert, der als Triebkraft für den Kraftabbau benötigt wird.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist es nicht möglich eine Unterscheidung zwischen dem Kraftabbau durch verschiedene mechanisch und thermisch aktivierte physikalische Mechanismen vorzunehmen, die in den Verbindungen zum Kraftabbau führen. Es wurde erwartet, dass mit zunehmender Temperatur weitere physikalische Mechanismen aktiviert werden, die zu einem deutlichen Unterschied des Kraftabbaus und damit unterschiedlichen Anstiegen der Regressionsgeraden geführt hätten. Wegen der großen Dehnung bei Schraubenverbindungen (MFF) mit federnden Spannscheiben konnte dieser Effekt nicht gezeigt werden.

Die linearen Regressionsfunktionen für Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 zeigen ein unterschiedliches Verhalten beim Kraftabbau abhängig von der Temperatur (Bild 7.32).

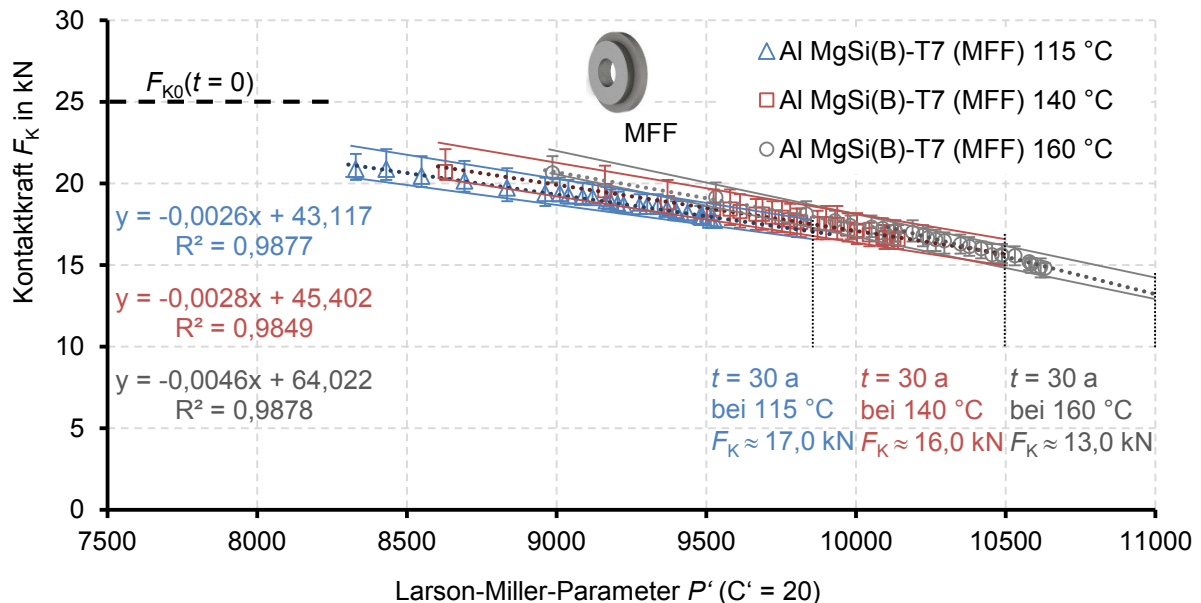


Bild 7.32: Kontaktkraft  $F_K$  von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 abhängig vom Larson-Miller-Parameter  $P'$  bei verschiedenen Dauerbetriebstemperaturen. Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf den Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  farbcodiert entsprechend der Temperatur.

Der Anstieg der Regressionsgeraden ist bei Temperaturen von 115 °C und 140 °C nahezu gleich und ähnlich zum Anstieg bei Schraubenverbindungen (MFF) mit Stromschienen aus Al 99,5(A). Das Entfestigen des Leiterwerkstoffs ab einer Temperatur von 140 °C (Kapitel 7.2.1) ist im Kraftabbau der Schraubenverbindungen wegen der federnden Spannscheiben nicht zu erkennen. Es wurde ein deutlicher Kraftabbau bei einer Temperatur von 140 °C im Vergleich zu den Versuchen bei einer Temperatur von 115 °C erwartet. Der Anstieg der Regressionsgeraden für die Verbindungen bei einer Temperatur von 160 °C ist höher. Bei höheren Betriebstemperaturen entfestigt sich der Werkstoff schneller und führt damit zu einem höheren Kraftabbau.

### 7.2.5 Zusammenhang zwischen der Kraft und dem Widerstand der Verbindung

Die Versuchsergebnisse zum Kraftabbau an Schraubenverbindungen mit Stromschienen in den Langzeitversuchen zeigen, mit Ausnahme der Versuche bei 160 °C, vorerst keine deutlichen Änderungen der Güte der Verbindungen (Kapitel 7.1). Um die Langzeitstabilität der Verbindungen anhand der Kontaktkraft  $F_K$  für längere Betriebszeiten abschätzen zu können, wird der Zusammenhang zwischen dem Verbindungswiderstand  $R_V$  und der Kontaktkraft  $F_K$  benötigt. Dazu wurden Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit Stromschienen in einer Materialprüfmaschine<sup>25</sup> mit dem Versuchsaufbau in (Bild 7.16 - Kapitel 7.1.2) und den

<sup>25</sup> Statische Materialprüfmaschine: Typ Zwick / Roell – 50 kN, Firma Zwick GmbH & Co. KG

angepassten Fügeelementen (Bild 7.10 - Kapitel 7.1.1) zum Untersuchen von Schraubenverbindungen durchgeführt.

Die Messungen erfolgten an Schraubenverbindungen mit und ohne federnde Fügeelemente ((OFF) - Kapitel 6.2.1, (MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen (Tabelle 7.9). Die Stromschienen wurden im Anlieferungszustand bei Raumtemperatur untersucht. Vor dem Fügen wurden die Kontaktflächen der Stromschienen identisch zu denen in den Langzeitversuchen (Kapitel 6.3) vorbehandelt. Fremdschichten wurden von der Oberfläche entfernt, sodass der Kontaktwiderstand  $R_K$  minimal wird. Mit der Materialprüfmaschine wurde die Kontaktkraft stufenweise erhöht und anschließend stufenweise verringert. Bei jeder Kraftstufe wurde der Verbindungswiderstand mehrmals mit einem Mikroohmmeter<sup>26</sup> gemessen (Bild 3.5, Bild 7.16). Aus dem Mittelwert der gemessenen und auf den Wert bei 20 °C umgerechneten Verbindungswiderstände (Gl. (35)), sowie dem Materialwiderstand wurde der Gütefaktor  $k_u$  (Gl. (16)) bestimmt.

Durch elastisches und überwiegend plastisches Verformen der Mikrospitzen vergrößern sich beim Verspannen der Verbindungen die Mikrokontakte. Der Gütefaktor  $k_u$  nähert sich damit einem stationären minimalen Wert an (Bild 7.33, Bild 7.34).

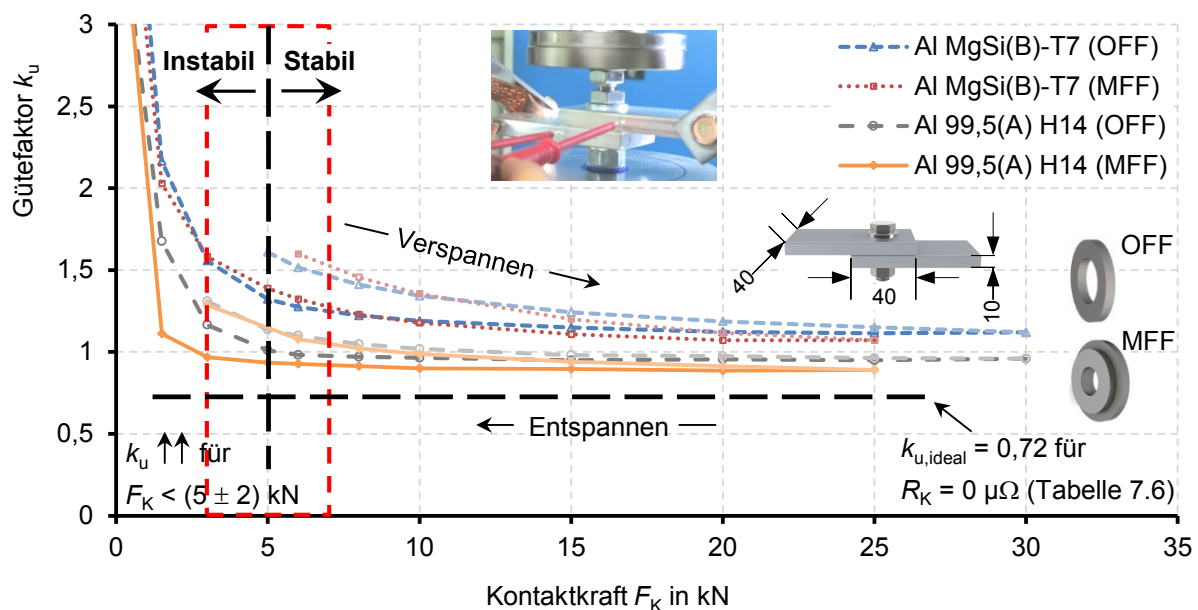


Bild 7.33: Zusammenhang zwischen dem Gütefaktor  $k_u$  und der Kontaktkraft  $F_K$  an Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen ((OFF) - Kapitel 6.2.1, (MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen der Maße 40 mm x 40 mm x 10 mm abhängig vom Werkstoff

Beim Entspannen bleibt der Gütefaktor zunächst konstant niedrig und erhöht sich sprunghaft, wenn eine statische Mindestkontaktkraft im Bereich von etwa  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN unterschritten wird. Dabei werden stromführende Mikrokontakte getrennt, sodass sich der Verbindungswiderstand deutlich erhöht. Es bildet sich eine Hysteresekurve zwischen den Gütefaktoren beim Ver- und Entspannen der Verbindung. Die Hysteresekurve ist bei den weichen, technisch

<sup>26</sup> Mikroohmmeter: Typ LoRe®, Firma Werner Industrielle Elektronik

reinen Aluminiumwerkstoffen Al 99,5(A) und Al 99,7 ausgeprägter als bei den Al-Mg-Si-Legierungen (Bild 7.33, Bild 7.34).

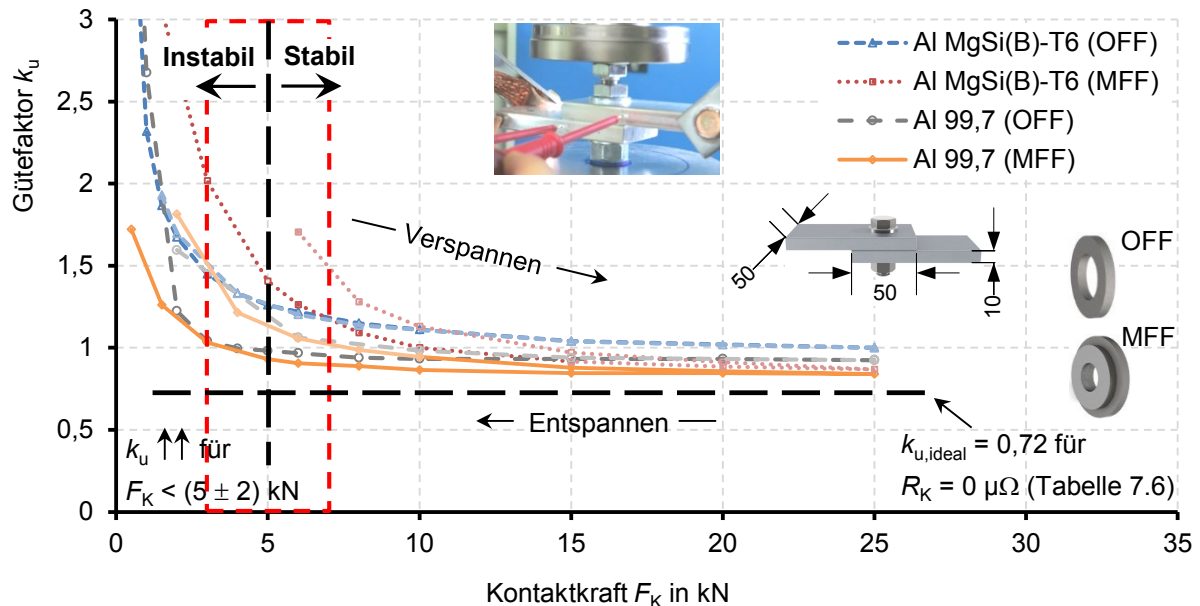


Bild 7.34: Zusammenhang zwischen dem Gütefaktor  $k_u$  und der Kontaktkraft  $F_K$  an Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen ((OFF) - Kapitel 6.2.1, (MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen der Maße 50 mm x 50 mm x 10 mm abhängig vom Werkstoff

Bei der maximalen Kontaktkraft  $F_{K,max} = 30$  kN wurden bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) höhere Gütefaktoren im Vergleich zu denen mit federnden Fügeelementen (MFF) bei  $F_{K,max} = 25$  kN ermittelt. Dies ist mit der Verteilung der mechanischen Spannung und der Größe des Druckkegels in der Trennfuge zwischen den Stromschienen bei den unterschiedlichen Fügeelementen zu erklären.

Bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) bildet sich ein schmaler Druckkegel mit einer inhomogenen mechanischen Spannungsverteilung und der höchsten mechanischen Spannung direkt am Bohrlochrand aus. Damit entstehen dort großflächige Mikrokontakte. Durch die schmale Form des Druckkegels formieren sich dafür aber nur sehr wenige Mikrokontakte im Randbereich der Verbindung. Im Gegensatz dazu wird bei Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) die Kontaktkraft durch die Spannscheiben sehr weit vom Bohrlochrand nach außen verteilt. Der Druckkegel wird breiter und die mechanische Spannung homogener verteilt. Dadurch formieren sich viele homogener verteilte, aber wahrscheinlich kleinflächigere Mikrokontakte. Durch den breiteren Druckkegel ist der Anteil wahrer Kontaktfläche  $A_w$  in der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  größer als bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) und damit der Gütefaktor kleiner.

Basierend auf den Messwerten ist es nicht möglich einen genauen und für alle Aluminiumwerkstoffe allgemeingültigen Wert für die Mindestkontaktkraft  $F_{K,min}$  anzugeben. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe haben einen Einfluss auf die Verformbarkeit und damit auch auf das Formieren der Mikrokontakte. Für diese Untersuchungen wurde ein Bereich der Mindestkontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN

experimentell bestimmt, bei dem sich die Gütefaktoren in Bezug zum Wert der Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  signifikant erhöhten. Für Schraubenverbindungen mit den hier untersuchten Stromschienen konnten die Werte aus anderen Arbeiten bestätigt werden [8], [35], [36], [37], [39]. Die Mindestkontaktkraft  $F_{K,\min}$  soll ausschließlich als Richtwert für das Bewerten der Alterung durch Kraftabbau dienen. Für die Bewertung des Alterungszustandes stromführender Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminiumwerkstoffen sind weitere Alterungsmechanismen zu berücksichtigen (Tabelle 4.1).

Werden die Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium für lange Zeit stromführend bei hohen Temperaturen gealtert, kann ein Haften zwischen den Leitern auftreten. Dabei sind die Stromschienen nur mit einem hohen Kraftaufwand nach dem Lösen der Schraubenverbindung voneinander zu trennen. Dieses Phänomen wurde auch an Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus reinem Kupfer beobachtet [8]. Das Haften wurde auf Diffusionsprozesse zurückgeführt. Es wird angenommen, dass die Kristallgitter beider Stromschienen in der Trennfuge zwischen den Stromschienen zusammenwachsen. Es wurde in den Langzeitversuchen ein Haften der Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 bereits bei Temperaturen von  $80 \text{ °C}$  und einer Betriebszeit von  $1.000 \text{ h}$  festgestellt. Ein stromführender Kontakt wäre in diesem Zustand, auch ohne eine äußere Kraft einzuprägen, möglich. Durch eine nicht definierte Kraft auf die stromführenden Verbindungen und einen zu geringen Kraftschluss zwischen den Leitern könnten diese haftenden Kontakte getrennt werden. Die Verbindung ist in diesem Zustand instabil.

### 7.3 Zusammenfassung

Beim stromdurchflossenen Flächenkontakt, in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen, ist die mechanische Spannung inhomogen auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  verteilt und das elektrische Kontaktverhalten komplexer als beim Punktkontakt zu beschreiben. Nahe an der Fase der Bohrung wurden die höchsten Werte der mechanischen Spannung bestimmt. Ausgehend vom Rand der Fase um das Bohrloch verteilt sich die mechanische Spannung im Werkstoff in Form eines Kegelstumpfs und nimmt an den Rändern stetig ab. In diesem Bereich des Druckkegels bildet sich die mechanisch tragende Kontaktfläche  $A_t$  und zu einem unbekannten Anteil auch die wahre stromführende Kontaktfläche  $A_w$  aus. Um eine Korrelation zwischen der Verteilung der mechanischen Spannung und dem elektrischen Kontaktverhalten in der Schraubenverbindung mit Stromschienen herzustellen, wurden numerische Berechnungsmodelle erstellt. Durch experimentelle Untersuchungen zum elektrischen Kontaktverhalten wurden diese verifiziert und teilweise validiert. Die Differenz  $\Delta R_V$  zwischen den numerisch berechneten Werten des Verbindungswiderstands und dem experimentell bestimmten, entspricht für Verbindungen mit Stahlelementen, mit den Abmessungen der gesamten scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$ , in erster Näherung dem Kontaktwiderstand  $R_K$ . Damit konnte für den untersuchten Leiterwerkstoff Al 99,5(A) H14 und der spezifischen Vorbehandlung der Kontaktfläche mit einer Stahldrahtbürste, der Parameter  $G'$  hergeleitet werden. Dieser Parameter beeinflusst bei der Modellierung der stromdurchflossenen Kontaktflächen  $A_{KF}$ , in den numerischen Berechnungsmodellen zum elektrischen Verhalten, die Stromdichteverteilung und damit den Verbindungswiderstand  $R_V$ . Der Wert des Parameters  $G'$  ist vom Wert der mechanischen Spannung abhängig. Die Größe, Form und

Anzahl der modellierten Kontaktflächen  $A_{KF}$  ist bereits angepasst auf die mechanische Spannungsverteilung für Schraubenverbindungen ((OFF) - Kapitel 6.2.1) mit Fügeelementen der Größe M12 und einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$ . Damit konnte ein Gütefaktor von  $k_u = 1,05$  für eine Kontaktfläche  $A_{KF}$  mit einer gemessenen mechanischen Spannung von  $\sigma \geq 2,5 \text{ N mm}^{-2}$  im Vergleich zu einem experimentell bestimmten Gütefaktor von  $k_u = 1,03$  berechnet werden.

In den Langzeitversuchen an Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen wurde gezeigt, dass sich die Kontaktkraft mit der Zeit und der Temperatur abbaut (Kapitel 7.1). Die zeitunabhängige und zeitabhängige plastische Verformung der Stromschienen unter mechanischer Last, ist bei den weichen, technisch reinen Aluminiumwerkstoffen und insbesondere bei Verbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) stärker als bei den zeitstandfesteren Aluminiumlegierungen oder bei Verbindungen mit den untersuchten federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2).

An Schraubenverbindungen (OFF) mit Stromschienen aus technisch reinem Aluminium wurde bei Temperaturen bis  $90^\circ\text{C}$  der stärkste Kraftabbau beobachtet. Für diese Werkstoffe und die untersuchten Fügeelemente sollte eine dauerhafte Grenztemperatur von  $90^\circ\text{C}$  nicht überschritten werden. Das Werkstoffverhalten des technisch reinen Al 99,5(A) H14 bis zu einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  und des Al 99,7 bei einer Temperatur von  $90^\circ\text{C}$  deuten abhängig von den experimentell ermittelten Werten der Härte (Bild 7.23) und der elektrischen Leitfähigkeit (Bild 7.26) bisher nicht auf eine Entfestigung hin. Die statische primäre Rekristallisation, ab einer homologen Temperatur von  $T/T_S \approx 0,4$  nach der Tammanschen Regel (Tabelle 4.3), z. B. bei Al 99,5(A) H14 mit  $(T/T_E \approx 0,42)^{27}$  ab einer Temperatur von  $115^\circ\text{C}$ , konnte bis zu einer Zeit von 10.000 h nicht in den Messwerten der Härte des Werkstoffs beobachtet werden.

Für die Al Mg-Si-Legierungen wurde, unabhängig vom Wärmebehandlungszustand (T6, T7), ein deutliches Entfestigen der Werkstoffe ab einer Temperatur von  $140^\circ\text{C}$  und einer Zeit beginnend zwischen (300 und 700) h beobachtet (Bild 7.24). Bei einer Temperatur von  $115^\circ\text{C}$  wurde das für den Werkstoff Al MgSi nicht festgestellt. Das Entfestigen der Al Mg-Si-Legierungen hat einen Einfluss auf den Kraftabbau insbesondere bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) und wird auf das Vergrößern der Ausscheidungen zurückgeführt. Durch die Ostwald-Reifung (Tabelle 4.3) hat sich außerdem die elektrische Leitfähigkeit deutlich mit der Zeit erhöht (Bild 7.25, Bild 7.26).

Bei Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) ist der Einfluss des Entfestigens für die Leiter aus Al MgSi(B)-T6 bei einer Temperatur von  $140^\circ\text{C}$  am stärksten ausgeprägt. Es wurde für die Verbindungen mit dem größten Kraftabbau in diesem Langzeitversuch ein minimaler extrapolierter Wert der Kontaktkraft von  $F_{K,EX} \approx 3 \text{ kN}$  nach einer Betriebszeit von 30 Jahren bestimmt. Dieser Wert unterschreitet die experimentell bestimmte Mindestkontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2) \text{ kN}$ . Die Schraubenverbindungen wären mit dieser Kontaktkraft nicht langzeitstabil. Das Entfestigen des Werkstoffs, mit einem stationären Wert

<sup>27</sup> Berechnete homologe Temperatur für den Mittelwert der absoluten Temperatur  $T_E$  für den angegebenen Erstarrungsbereich von Al 99,5(A) (Tabelle 2.2).

der Härte als Indikator, war bis zu einer Zeit von etwa  $t = 10.000$  h nicht abgeschlossen. Beim Erreichen stationärer Werte der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs vor einer Betriebszeit von 30 Jahren, könnte das zu einem Verlangsamen des Kraftabbaus und damit zu einem höheren Wert der extrapolierten Kontaktkraft  $F_{K,EX}$  führen.

Für stromführende Verbindungen mit Stromschienen aus Al-Mg-Si-Legierungen wird eine Grenztemperatur von  $115\text{ °C}$  empfohlen, bei der noch kein Entfestigen der Werkstoffe nach einer Zeit von  $10.000$  h beobachtet wurde.

Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) mit Stromschienen aus der Legierung Al Mn0,5Mg0,5 zeigten den geringsten Kraftabbau bei einer Temperatur von  $140\text{ °C}$ . Für diese Verbindungen wurde zudem eine höhere mittlere Kontaktkraft nach einer Zeit von  $20.000$  h bestimmt als für Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und Stromschienen aus verschiedenen Werkstoffen, die bei einer geringeren Temperatur beansprucht wurden. Das wird auf die hohe Kriechbeständigkeit durch die thermisch stabilen Partikel (Dispersoide) zurückgeführt, die die Versetzungsbewegung behindern. In der Mikrostruktur dieser Legierung wurden in Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) Dispersoide mikroskopisch nachgewiesen [15]. Durch eine hohe Kriechbeständigkeit wird die viskoplastische Verformung der Stromschienen verringert und der Kraftabbau in der Schraubenverbindung reduziert. Um das Langzeitverhalten und die Grenztemperatur für diese Legierung abschätzen zu können, sollten die Untersuchungen fortgeführt und zusätzliche Versuche bei höheren Temperaturen durchgeführt werden. Der Kraftabbau deutet darauf hin, dass eine dauerhafte Betriebstemperatur von  $140\text{ °C}$  möglich ist. Es muss jedoch die im Vergleich zu den anderen untersuchten Werkstoffen geringere elektrische Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit berücksichtigt werden (Kapitel 7.2.1 und Kapitel 7.2.2).

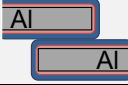
In einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) und Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 ist in der Trennfuge zwischen den Unterlegscheiben und der Leiteroberfläche die mechanische Spannung stellenweise bedeutend höher als die Dehngrenze des Werkstoffs (Tabelle 6.2) und führt zum Verfestigen. Im Vergleich zum Verformungsmechanismen-Diagramm (Bild 4.3), für ein nicht genauer spezifiziertes reines Aluminium, ist damit von einer großflächigen plastischen Verformung durch Versetzungsgleiten in diesem am höchsten mechanisch belasteten Bereich auszugehen. Durch die plastische Verformung vergrößert sich die mechanisch tragende Fläche unter der Unterlegscheibe und die mechanische Spannung verringert sich auf Werte nahe der Fließgrenze. Dem plastischen Verformen durch das Gleiten von Versetzungen überlagert sich nach diesem Diagramm ab einer homologen Temperatur  $T/T_s \approx 0,4$  und diesen hohen mechanischen Spannungen das Versetzungskriechen. Das Klettern von Stufenversetzungen und die Diffusion von Leerstellen sind bei dieser Temperatur thermisch aktiviert (Tabelle 4.4). Durch die thermische Aktivierung des Kletterns von Stufenversetzungen ist zusätzlich der physikalische Mechanismus der dynamischen Erholung als wesentlicher Teilschritt des Versetzungskriechens angeregt. In dem stark umgeformten Bereich unter den Unterlegscheiben könnte auch die dynamische primäre Rekristallisation zum Entfestigen führen. Ein Hinweis auf statische primäre Rekristallisation im mechanisch unbelasteten Aluminiumwerkstoff wurde aber auch bei Temperaturen von  $220\text{ °C}$  und einer Belastungszeit von  $t = 10.000$  h nicht gefunden.



## 8 Elektrisches Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit vernickelten und versilberten Stromschienen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an Schraubenverbindungen mit zwei beschichteten Stromschienen, mit identischem metallischen Überzug (Tabelle 8.1) und an Schraubenverbindungen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene (Tabelle 8.2) durchgeführt. Die Schraubenverbindungen wurden mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al MgSi-T6, sowie Al 99,5(A) H14 (Tabelle 6.1, Tabelle 6.2, Tabelle 6.3) montiert. Das Langzeitverhalten der Verbindungen wurde bei einer konstanten Temperatur von 115 °C und 140 °C im Wärmeschrank (W) und stromdurchflossen in Hochstromkreisen (S) untersucht (Kapitel 6.3 und 6.4).

Tabelle 8.1: Untersuchte Kombinationen: Leiterwerkstoff, metallischer Überzug und Schichtdicke für Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei identisch beschichteten Stromschienen

Kontakt:  Beschichtet Beschichtet		Langzeitversuche bei 115 °C und 140 °C  Metallische Überzüge mit Deckschicht (DS) und Zwischenschicht (ZS), sowie der Schichtdicken in µm.											
Deckschicht (DS)		Ag		Ag		Ni		Ni-P (Typ – s. Kapitel 2.2)					
								Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5		
Zwischenschicht (ZS)		Ni-P (Typ 5)		Cu		--		--	--	--	--		
Dicke in µm	DS <sup>28</sup>	2,5	5,0	2,5	5	10	5	10	10	10	2,5	5	10
	ZS <sup>29</sup>	1,25	2,5	2,5	5	10	--	--	--	--	--	--	--
Leiterwerkstoff	Al 99,5(A)					S / W	S / W	W	W	W			S / W
	Al MgSi	W	W	S / W	W	S / W				W	S / W	W	S / W
Art der Langzeitversuche:		Stromdurchflossen (S) 5 Verbindungen						Lagerung im Wärmeschrank (W) 3 Verbindungen					

Es wurde das elektrische Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen und metallischen Überzügen aus Nickel und Silber verglichen. Die Werkstoffeigenschaften von Silber und Nickel, insbesondere als galvanisch abgeschiedener metallischer Überzug, sind sehr unterschiedlich (Tabelle 2.7, Tabelle 2.8). In dieser Arbeit wurden Silber (Ag) und Nickel (Ni) elektrolytisch (Kapitel 2.2.1), sowie eine Legierung aus Nickel und Phosphor (Ni-P) autokatalytisch (Kapitel 2.2.2) auf Stromschienen aus Aluminium abgeschieden. Das Abscheiden des metallischen Überzugs aus Silber erfolgte im Mehrschichtsystem mit Zwischenschichten aus elektrolytisch abgeschiedenem Kupfer (Cu) und autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5).

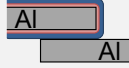
Der Einfluss des Phosphorgehaltes in metallischen Überzügen aus Ni-P auf das elektrische Verhalten der Verbindungen in den Langzeitversuchen wurde für vier unterschiedliche Typen,

<sup>28</sup> DS ... Deckschicht: steht im direkten Kontakt zur Deckschicht oder unbeschichteten Kontaktfläche der zweiten Stromschiene

<sup>29</sup> ZS ... Zwischenschicht: haftvermittelnde und diffusionshemmende Schicht zwischen dem Leiterwerkstoff der Stromschiene und der Deckschicht

von Ni-P (Typ 2) mit einem niedrigen Phosphorgehalt bis hin zu Ni-P (Typ 5) mit einem hohen Phosphorgehalt [N12], untersucht (Kapitel 8.6.1). An je einer Schraubenverbindung mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium und einem metallischen Überzug aus Ni und Ni-P (Typ 5) erfolgten zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss eines Wechsellastbetriebs auf das elektrische Verhalten. Nach einem Dauerlastbetrieb (DL) mit einer Zeit von  $t = 8.000$  h bei einer Temperatur von  $140^\circ\text{C}$  im Wärmeschrank wurden an diesen Verbindungen Temperaturlastzyklen (TLZ) durchgeführt und damit eine mögliche Alterung durch Versatzbewegungen in der Trennfuge zwischen den Stromschienen untersucht (Kapitel 8.6.2). Um das Altern der Verbindungen durch Interdiffusion mit der Bildung intermetallischer Phasen (IMP) untersuchen zu können, wurde der Einfluss der Schichtdicke auf das Langzeitverhalten der Verbindungen betrachtet. Weiterhin wurde untersucht, warum für Verbindungen mit einem beschichteten und einem unbeschichteten Kontaktpartner unterschiedliche zugelassene Grenztemperaturen gelten (Tabelle 8.2), die in den beiden internationalen Normen für Geräte der Hochspannungstechnik angegeben werden (Tabelle 2.6).

Tabelle 8.2: Untersuchte Kombinationen: Leiterwerkstoff, metallischer Überzug und Schichtdicke für Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium

Kontakt:		Langzeitversuche bei $115^\circ\text{C}$ und $140^\circ\text{C}$						
 Beschichtet Unbeschichtet		Metallische Überzüge mit Deckschicht (DS) und Zwischenschicht (ZS), sowie der Schichtdicken in $\mu\text{m}$ .						
Deckschicht (DS)		Ag		Ag		Ni	Ni-P Typ 5	
Zwischenschicht (ZS)		Ni-P (Typ 5)		Cu		--	--	
Dicke in $\mu\text{m}$	DS	5	10	5	10	5	5	10
	ZS	2,5	5	5	10	--	--	--
Leiter- werkstoff	Al 99,5(A)				W	W		W
	Al MgSi	W	W	W	W	W	W	W
Art der Langzeitversuche:		Lagerung im Wärmeschrank (W) 3 Verbindungen						

Alle Schraubenverbindungen wurden mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) mit den in Tabelle 6.3 aufgeführten Stromschienengeometrien gefügt. Dadurch wurde der Einfluss des Kraftabbaus auf die Alterung der Verbindung minimiert und es konnte der Einfluss von Schichtveränderungen z. B. durch gebildete IMP auf das Kontakt- und Langzeitverhalten näher betrachtet werden. Die stromführenden Verbindungen in den Hochstromkreisen stellen den Anwendungsfall nach, während bei den im Wärmeschrank gelagerten Verbindungen eine mögliche Alterung durch Elektromigration (Tabelle 4.1) ausgeschlossen werden kann. Bei den stromführenden Verbindungen in den Langzeitversuchen wurden je Beschichtungsvariante fünf Verbindungen untersucht, von denen je zwei mit Kraftmesseinrichtung (Bild 6.6) aufgebaut wurden. Es wurde regelmäßig die Temperatur an der Oberfläche der Verbindungen mit einem Handtemperaturmessgerät<sup>30</sup> ermittelt und der Belastungsstrom entsprechend nachgestellt. Im Wärmeschrank wurden je Variante drei Verbindungen gelagert. Die

<sup>30</sup> Temperaturmessgerät mit Messfühler: Typ Almemo, Firma Ahlborn

Verbindungswiderstände  $R_V$  wurden abhängig von der Zeit für alle Verbindungen im ausgeschalteten, abgekühlten Zustand bei Raumtemperatur mit einem Mikroohmmeter<sup>31</sup> gemessen und daraus die Gütefaktoren  $k_u$  (Gl. (16)) ermittelt. Neben den gültigen Temperaturen, die in den geltenden Standards für Anlagen der Elektroenergietechnik angegeben sind, wurden auch Versuche bei 220 °C durchgeführt. In diesen Versuchen wurde das Wachstum von IMP beschleunigt. Ziel dieser Untersuchungen war es, in kurzer Zeit physikalische Effekte hervorzurufen und diese mikroskopisch sichtbar zu machen. Damit sollten Hinweise auf die Alterung von Verbindungen, die bei einer geringeren Temperatur für eine längere Zeit beansprucht wurden, hergeleitet werden. Für gezielte mikroskopische Untersuchungen (Kapitel 8.5), insbesondere in der Trennfuge zwischen den Leitern, wurden Stromschienen mit längs- und quergerillten Kontaktflächen verwendet (Bild 6.1). Beim Fügen dieser gerillten Stromschienen wurden bewusst Kreuzungspunkte erzeugt, die im metallografischen Schliff gezielt untersucht werden konnten.

### 8.1 Untersuchungen zum Kontaktverhalten

Um das elektrische Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und metallischen Überzügen aus Nickel und Silber vergleichen zu können, wurde der Verbindungswiderstand  $R_V$  abhängig von der Kontaktkraft  $F_K$  (s. Kapitel 7.2.5) gemessen. Dazu wurden Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) in einer Materialprüfmaschine<sup>32</sup> mit dem Versuchsaufbau in (Kapitel 7.1.2, Bild 7.16) und den angepassten Fügeelementen (Kapitel 7.1.1, Bild 7.10) durchgeführt. Es wurden Verbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Al MgSi-T6 (Tabelle 6.2), sowie Verbindungen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene untersucht. Die Untersuchungen erfolgten an den metallisch überzogenen Stromschienen im Anlieferungszustand. Vor dem Verbinden wurden die Kontaktflächen der Leiter, vergleichbar zu denen in den Langzeitversuchen, werkstoffabhängig vorbehandelt (Kapitel 6.3).

Für jede Variante des metallischen Überzugs wurden die Stromschienen mit den minimalen Schichtdicken (Tabelle 8.1) verbunden und mit der Materialprüfmaschine die Kontaktkraft bis auf  $F_K = 25$  kN stufenweise erhöht und danach stufenweise verringert. Aus dem mehrmals je Kraftstufe gemessenen Verbindungswiderstand  $R_V$  wurde der Mittelwert bei 20 °C bestimmt und damit der Gütefaktor  $k_u$  (Gl. (16)) ermittelt. Beim Verspannen und Entspannen der Verbindungen bildete sich eine Hysterese für die Werte des Gütefaktors  $k_u$  abhängig von der Kontaktkraft  $F_K$ . Die Hysterese war bei Verbindungen mit zwei versilberten Stromschienen schmal (Bild 8.1, Bild 8.2). Im Vergleich dazu war die Hysterese beim Kontakt zwischen zwei vernickelten Stromschienen ausgeprägt (Bild 8.1).

<sup>31</sup> Mikroohmmeter: Typ LoRe®, Firma Werner Industrielle Elektronik

<sup>32</sup> Statische Materialprüfmaschine: Typ Zwick / Roell – 50 kN, Firma Zwick GmbH & Co. KG

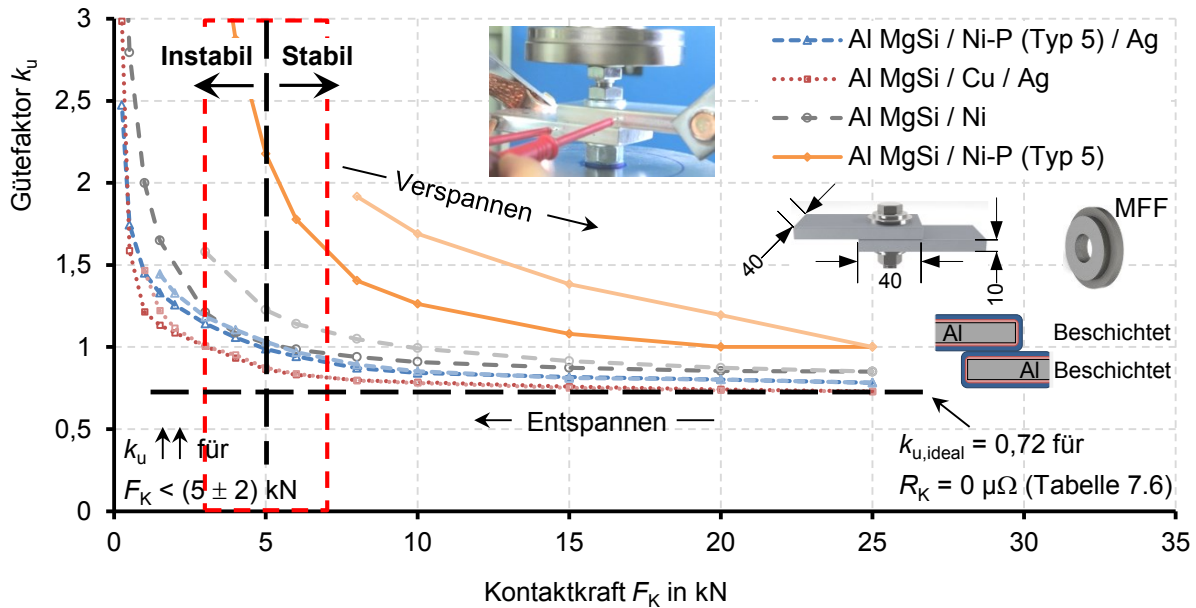


Bild 8.1: Elektrisches Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Al MgSi-T6 mit minimalen Schichtdicken

Metallische Überzüge mit einer Deckschicht aus Silber wurden nicht abrasiv vorbehandelt, sondern nur mit Ethanol gereinigt und hatten im Anlieferungszustand keine sichtbaren Fremdschichten. Durch die glatte, fremdschichtfreie Oberfläche wurden beim Verspannen bis zu einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  keine signifikanten plastischen Verformungen der Mikrospitzen hervorgerufen, die zu einer Hysterese geführt hätten (vgl. [8]). An diesen Verbindungen wurden die niedrigsten Werte des Gütefaktors von  $0,73 \leq k_u \leq 0,78$  ermittelt (Bild 8.1, Bild 8.2). Eine Zwischenschicht aus Cu führte dabei zu niedrigeren Werten des Gütefaktors als eine Zwischenschicht aus Ni-P (Typ 5). Das Ni-P (Typ 5) hat mit  $\kappa \approx 1,0 \text{ MS m}^{-1}$  eine viel geringere elektrische Leitfähigkeit als reines Cu mit  $\kappa \approx 60,0 \text{ MS m}^{-1}$  (Tabelle 2.8). Die Gütefaktoren für die Schraubenverbindungen (MFF) mit versilberten Stromschienen sind wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit des Silbers fast ideal. Für Schraubenverbindungen mit Stromschienen dieser Geometrie wurde für einen Kontaktwiderstand von  $R_K = 0 \mu\Omega$  der minimal mögliche Gütefaktor  $k_{u,ideal} = 0,72$  numerisch berechnet (Kapitel 7.1.2, Tabelle 7.6).

Im Vergleich dazu wurden bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni und autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) ausgeprägte Hysteresekurven bestimmt (Bild 8.1, Bild 8.2). Bei Verbindungen mit einer unbeschichteten und einer vernickelten Stromschiene wurden dabei geringere Werte des Gütefaktors  $k_u$  bei einer kleinen Kontaktkraft  $F_K$  im Vergleich zu Verbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen ermittelt. Dieses Verhalten kann durch die in [77] aufgestellte Theorie zum elektrischen Kontakt zwischen Ni - Ni und Al - Ni erklärt werden (Kapitel 4.3, Bild 4.7 a), b)). Je größer die Anzahl stark plastisch verformter Mikrospitzen auf den Leiteroberflächen ist, desto geringer ist der Gütefaktor. In den Versuchen wurden die Kontaktflächen der vernickelten Stromschienen abrasiv vorbehandelt, Nickel oxidiert jedoch schnell (Kapitel 2.2). Während des Verspannens bis zu einer Kontaktkraft von

$F_K = 25 \text{ kN}$  wurden dünne Fremdschichten aufgebrochen und die kleinen Mikrospitzen lokal höher mechanisch beansprucht, wodurch sich diese plastisch verformten.

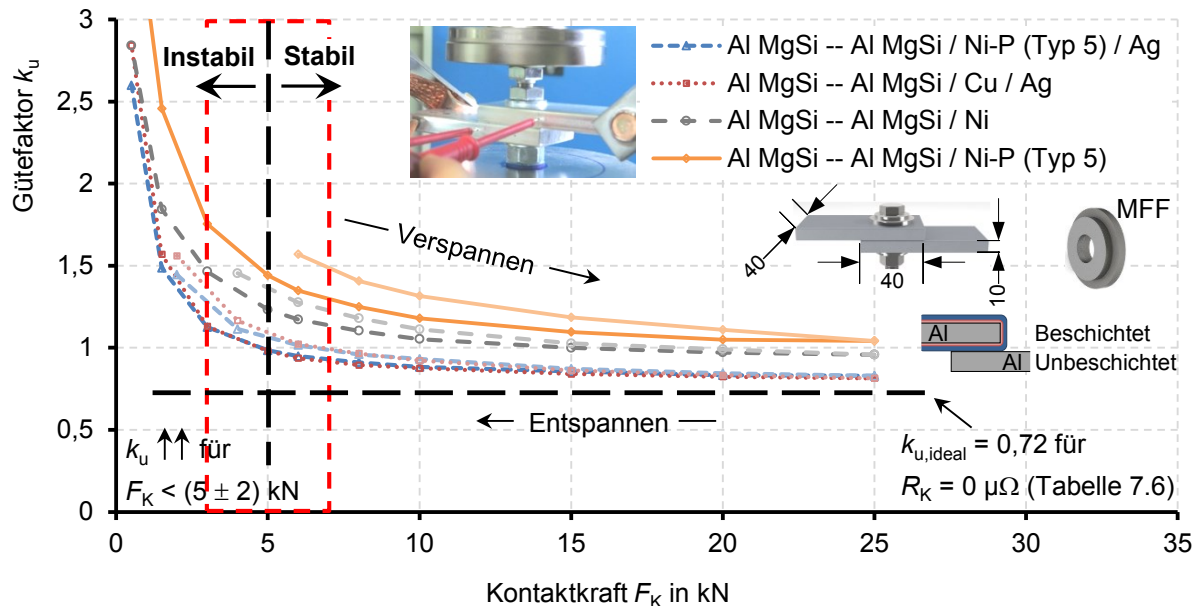


Bild 8.2: Elektrisches Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) - Kapitel 6.2.2) und einer beschichteten (minimale Schichtdicken) und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6

Aufgrund der hohen mechanischen Festigkeit und Elastizitätsmoduln der metallischen Überzüge aus Nickel wird angenommen, dass sich in Verbindungen zwischen zwei vernickelten Kontaktpartnern hauptsächlich elastisch verformte Kontakte während des Verspannens formierten. Die Minimalwerte des Gütefaktors sind für Verbindungen mit vernickelten Kontaktpartnern bei einer Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  höher als bei denen mit versilberten Kontaktpartnern oder Verbindungen zwischen einer unbeschichteten und einer vernickelten Stromschiene aus Al MgSi (Bild 8.1, Bild 8.2).

Während des Entspannens der Verbindungen blieb nur ein kleiner Anteil an Mikrokontakten bis zu einer Kontaktkraft von  $F_K = 20 \text{ kN}$  (Bild 8.1) mechanisch stabil. Bei einer geringeren Kontaktkraft erhöhte sich der Gütefaktor stetig durch das Verkleinern der stromführenden Querschnittsfläche in den elastisch verformten Mikrokontakten, sowie dem Aufbrechen von Mikrokontakten. Damit verringert sich der Anteil an wahrer stromtragender Kontaktfläche  $A_w$ . Wegen der geringen Flächenpressung bei Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) wurden insbesondere für Verbindungen mit zwei identisch beschichteten Leitern und einem metallischen Überzug aus hartem und schlecht elektrisch leitenden Ni-P (Typ 5) die höchsten Gütefaktoren im montierten Zustand ermittelt (Bild 8.1). An Schraubenverbindungen mit einer unbeschichteten und einer vernickelten Stromschiene aus Al MgSi wurden beim Entspannen auch bei geringen Kontaktkräften bis etwa  $F_K = 10 \text{ kN}$  noch konstant niedrige Werte des Gütefaktors bestimmt (Bild 8.2). Durch die geringere Härte an der Oberfläche der unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi im Vergleich zu dem harten elektrolytisch abgeschiedenem Nickel Ni und autokatalytisch Ni-P (Typ 5) verformen sich die Mikrospitzen auf der unbeschichteten Oberfläche zu einem größeren Anteil plastisch. Dadurch

brechen die Mikrokontakte erst bei geringeren Kontaktkräften auf und führen damit zu einem Erhöhen des Gütefaktors.

Zusammenfassend kann für die Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei beschichteten Stromschienen und denen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium eine Mindestkontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN angegeben werden. Trotz des schlechten Kontaktverhaltens von Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen und einem metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) (Bild 8.1) wurde für diesen Bereich der Mindestkontaktkraft der Gütefaktor von  $k_u = 1,5$  nicht überschritten (Kapitel 3.2).

## 8.2 Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen

Das Langzeitverhalten wurde an drei bis fünf Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und je zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Aluminium untersucht. Die Verbindungen mit versilberten Stromschienen aus Al MgSi und einer Zwischenschicht aus Ni-P (Typ 5) wurden für eine Zeit von  $t = 20.000$  h untersucht. Das Langzeitverhalten der Verbindungen mit den weiteren metallischen Überzügen wurde für eine Zeit von  $t = 25.000$  h betrachtet. In der Auswertung sind die Mittelwerte und auch die Einzelwerte des Gütefaktors  $k_u$  für die stromführenden und im Wärmeschrank gelagerten Schraubenverbindungen im Neuzustand nach der Montage  $k_{u0}$  und nach der entsprechenden Betriebszeit bei (115 und 140) °C dargestellt (Bild 8.3).

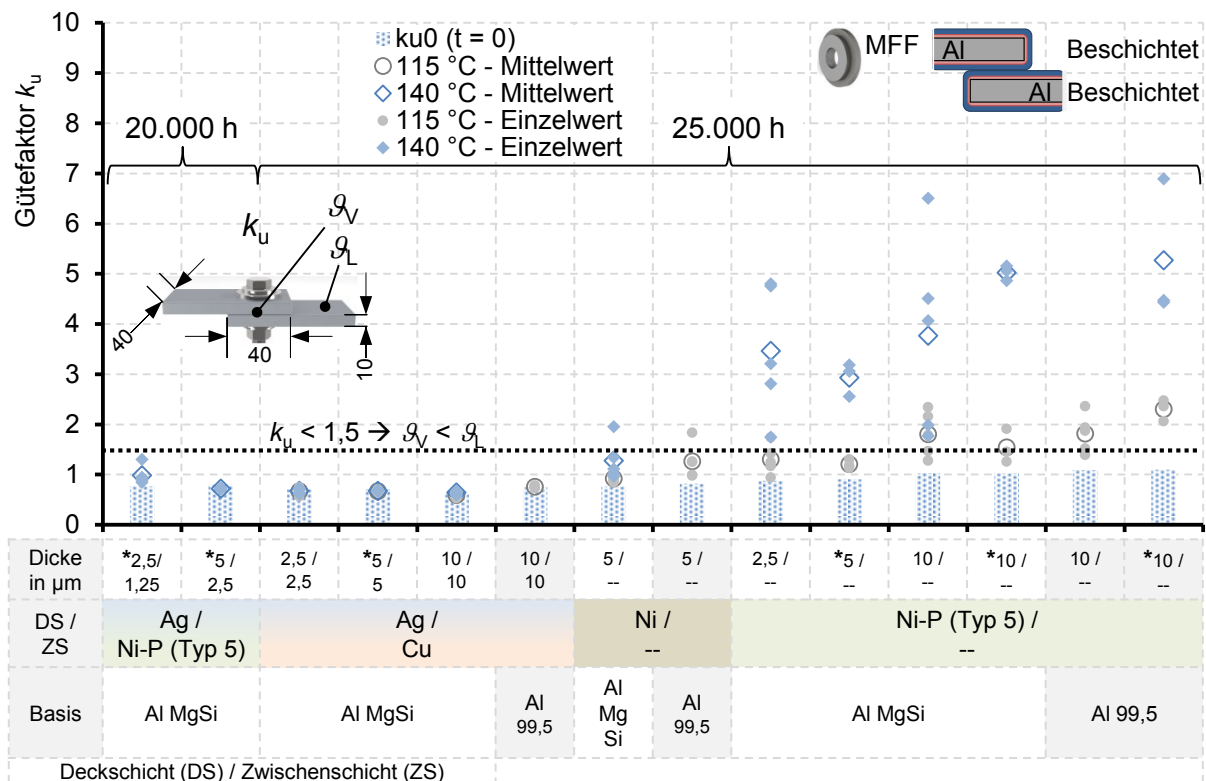


Bild 8.3: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei beschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromführend und im Wärmeschrank\* über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gealtert

Nach der Montage ist der Mittelwert des Gütefaktors aller Verbindungen je Beschichtungsvariante mit  $0,7 < k_u \leq 1,1$  als sehr gut zu bewerten (Kapitel 3.2). Bei einem Anfangsgütefaktor von  $k_{u0} < 1,5$  sind die Schraubenverbindungen (MFF) und Stromschienen mit diesem Querschnitt von 40 mm x 10 mm eine Wärmesenke gegenüber den homogen durchströmten Leiter (Kapitel 3.2).

Die Gütefaktoren der Verbindungen mit versilberten Stromschienen sind nach der entsprechenden Versuchszeit und thermischen Beanspruchung kleiner als unmittelbar nach der Montage  $k_{u0}$ . Dieses Verhalten wurde bereits nach wenigen Betriebsstunden bei stromführenden Kontakten und Verbindungen beobachtet [8], [9], [37], [41]. Durch das lokale Entfestigen des Silbers [81] an den mechanisch hoch beanspruchten Mikrokontakten in der Kontaktebene, vergrößern sich diese [33]. Der Kontakt- und damit der Verbindungswiderstand werden kleiner.

Im Vergleich dazu haben sich die Gütefaktoren für Verbindungen mit Nickeldecksschichten während des Betriebs erhöht (Bild 8.3). Die Kontaktkraft der untersuchten Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und einer Kraftmess-einrichtung (Kapitel 8.3, Bild 8.8) hat sich dabei nicht unter den Wert der Mindestkontaktkraft von etwa  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN der jeweiligen Beschichtungsvarianten verringert (Kapitel 8.1).

Insbesondere bei metallischen Überzügen aus Ni-P (Typ 5) wurden hohe Gütefaktoren und eine sehr große Spannweite zwischen den Messwerten bestimmt. Bei diesen Versuchen wurde kein signifikanter Einfluss durch die unterschiedlichen Aluminiumwerkstoffe und der untersuchten Schichtdicken der metallischen Überzüge festgestellt. Das Altern von stromführenden Verbindungen führte zu ähnlichen Ergebnissen wie für die stromlos im Wärmeschränk gelagerten Verbindungen. Demzufolge kann eine beschleunigte Alterung von stromdurchflossenen Flächenkontakten durch Elektromigration in diesen Versuchen ausgeschlossen werden. Die Temperaturen, bei der die Verbindungen gealtert wurden, hatten den größten Einfluss.

Bei Schraubenverbindungen mit metallischen Überzügen aus Nickel waren die Gütefaktoren bei einer konstanten Temperatur von 140 °C im Vergleich zu den Versuchen bei 115 °C höher. Die Differenz zwischen den Gütefaktoren nach der Montage und dem gealterten Zustand nach einer Zeit von 25.000 h war dabei für Verbindungen mit Stromschienen und einem metallischen Überzug aus Ni wesentlich geringer als für Verbindungen mit Stromschienen und einem metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5). Dies wird auf die unterschiedlichen elektrischen und mechanischen Eigenschaften dieser metallischen Überzüge zurückgeführt (Tabelle 2.7, Tabelle 2.8). Die Härte der Überzüge ist im Ausgangszustand identisch und führt wahrscheinlich dazu, dass sich die Mikrokontakte im Vergleich zum weicheren Silber überwiegend elastisch verformen. Dies wird durch die geringere mittlere mechanische Spannung in der Trennfuge zwischen den vernickelten Stromschienen bei Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) noch verstärkt. Durch die nahezu homogene mechanische Spannungsverteilung mit kleinen Werten der mechanischen Spannung in dem breiten Druckkegel haben die Mikrokontakte eine kleine Querschnittsfläche und sind homogen in der Kontaktebene verteilt. Dadurch können diese während des Betriebs leichter aufbrechen als große plastisch verformte Mikrokontakte.



### 8.2.1 Zeit- und temperaturabhängige Härte der metallischen Überzugwerkstoffe

Bei Verbindungen mit beschichteten Leitern wird das elektrische Kontaktverhalten im Wesentlichen von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften des metallischen Überzugwerkstoffs bestimmt. Zum mechanischen Charakterisieren, sowie zum Indizieren von Gefügeveränderungen während der thermischen Beanspruchung und der Zeit, wurde die Härte der hier untersuchten Überzugwerkstoffe bestimmt. Es wurde die Vickers-Mikrohärte vom IfWW<sup>33</sup> der Technischen Universität Dresden in den einzelnen Schichten der metallischen Überzüge ermittelt. Mit einem Prüfgewicht von 1 g (HV0,001) erfolgten fünf Härtemessungen, direkt im metallischen Überzug, auf beiden Seiten des metallografischen Querschliffs eines beschichteten Stromschienenabschnitts (Bild 8.4).

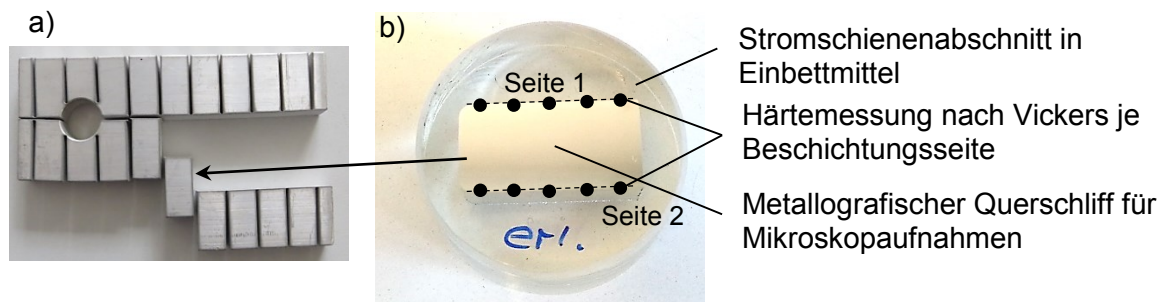


Bild 8.4: a) Abschnitte beschichteter Stromschienen, b) Abschnitt in Einbettmittel für mikroskopische Untersuchungen am Querschliff und zum Bestimmen der Härte in den metallischen Überzügen

Es wurden die beschichteten Stromschienen mit maximaler Schichtdicke je Beschichtungsvariante entsprechend Tabelle 8.1 untersucht. Aus den beschichteten Stromschienen wurden mit einem Wasserstrahlschneidgerät<sup>34</sup> einzelne Abschnitte, mit einem minimalen Wärmeeintrag während des Schneidvorgangs, hergestellt. Diese Abschnitte wurden im Neuzustand ( $t = 0$ ) und nach einer bestimmten Zeit bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Die Alterung der Stromschienenabschnitte wurde im Wärmeschrank bei 115 °C, 140 °C und 220 °C durchgeführt.

Zum Ermitteln der Mikrohärte von metallischen Überzugwerkstoffen im metallografischen Querschliff wird nach [N30] eine Schichtdicke von 100 µm für weiche Schichten (HV0,025) und 80 µm für harte Schichten (HV0,1) gefordert. Dabei wird beim Bestimmen der Härte nach [N29] ein pyramidenförmiger Eindringkörper mit quadratischer Grundfläche verwendet. Der Mittelpunkt des Prüfeindrucks soll für die untersuchten Metalle mindestens einen Abstand des zweieinhalbfachen vom Rand der Probe haben. Diese Forderungen nach Norm konnten bei den Messungen, insbesondere am weichen Silber, nicht eingehalten werden (Bild 8.5).

<sup>33</sup> Institut für Werkstoffwissenschaften der Technischen Universität Dresden

<sup>34</sup> Vermindern von Reibungswärme in der Trennzone zum Verhindern von Gefügeveränderungen



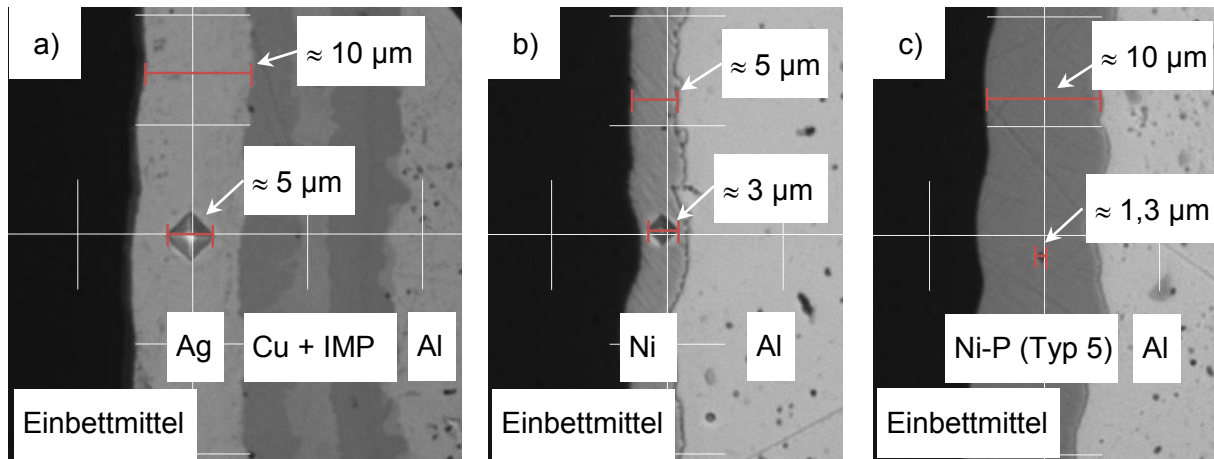


Bild 8.5: Je ein Prüfeindruck für die Messung der Vickers-Mikrohärte in thermisch belasteten Proben (10.000 h bei 220 °C), a) Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Cu und einer Deckschicht aus Ag, b) Al MgSi mit einer elektrolytisch abgeschiedenen Deckschicht aus Ni, c) Al MgSi mit einer autokatalytisch abgeschiedenen Deckschicht aus Ni-P (Typ 5)

Es wurde die kleinste Prüflast verwendet, die mit dem Härtemessgerät einsetzbar war. Durch vergleichende Messungen zur Härte der metallischen Überzugwerkstoffe an mehreren Proben und zusätzlich an Proben mit identischem metallischen Überzug auf verschiedenen Leiterwerkstoffen wurde die Messunsicherheit minimiert. Es sind hier die Trends zwischen den Härtewerten im Neuzustand und dem gealterten Zustand der Proben zu sehen. Aus den Einzelmesswerten wurde der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt (Bild 8.6).

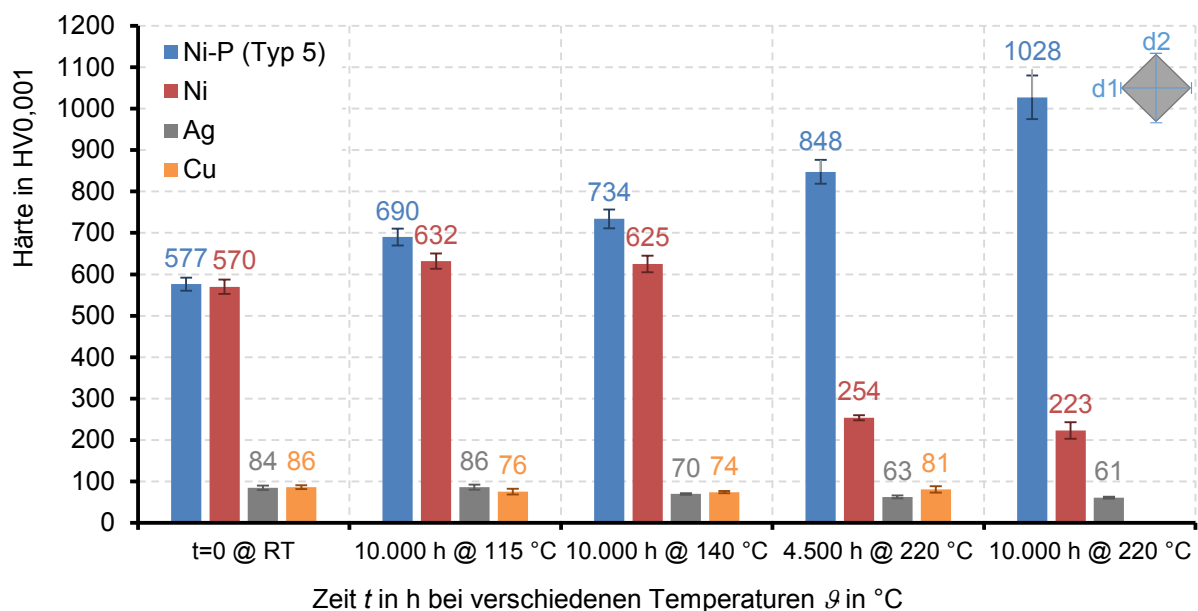


Bild 8.6: Vickers-Mikrohärte der untersuchten metallischen Überzüge abhängig von der Temperatur und der Zeit

Im Neuzustand haben die metallischen Überzüge aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni und autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) einen ähnlichen Wert der Härte zwischen (550 ... 600) HV0,001. Bei elektrolytisch abgeschiedenem Ni ist dieser Wert einem Überzug

mit einem hohen Anteil an Glanzbildnern zuzuordnen. Metallische Überzüge mit einem geringeren Anteil an Glanzbildnern (Matt-, Halbglanznickel) sind weicher. [22]

Wegen der geringeren mechanischen Festigkeit bei weichen metallischen Überzügen können sich beim Verbinden von beschichteten Leitern die Mikrospitzen stärker plastisch verformen und damit zu einem kleinen Kontaktwiderstand in der Verbindung führen. Bei versilberten Stromschienen mit einer Zwischenschicht aus Cu wurden im Neuzustand ähnliche Werte der Härte zwischen (70 ... 90) HV0,001 im Silber und dem Kupfer ermittelt.

Nach der Lagerung im Wärmeschränk wurden deutliche Veränderungen der Härte für Silber und Nickel beobachtet. Der metallische Überzug Ni-P (Typ 5) hatte bereits ab einer Temperatur von 115 °C nach einer Zeit von  $t = 10.000$  h um 20 % höhere Werte der Härte infolge der Ausscheidungshärtung [N12]. Bei Silber und elektrolytisch abgeschiedenem Ni verringerten sich die Härtewerte insbesondere bei einer Temperatur von 220 °C bereits nach einer Zeit von  $t = 4.500$  h um 27 % bei Silber und um 55 % bei elektrolytisch Ni. Das Entfestigen der elektrolytisch abgeschiedenen metallischen Überzüge, mit einer kristallinen Struktur (Kapitel 2.2) [22], ist wahrscheinlich auf die Kornvergrößerung während der thermischen Beanspruchung (Kapitel 4.2.2 - Tabelle 4.3) zurückzuführen. Anhand der Verteilung und der Größe der Körner in den metallischen Überzugwerkstoffen wurde dies aber nicht nachgewiesen.

Für metallische Überzüge aus Silber wurden bereits ab einer Temperatur von 140 °C bis zu einer Zeit nach  $t = 10.000$  h niedrigere Werte der Härte bestimmt. Das Entfestigen von Reinsilber wurde bereits in [81] experimentell untersucht und nachgewiesen.

Die Härte der Zwischenschichten aus Kupfer auf den Stromschienen aus Aluminium ist insbesondere bei 220 °C durch die gebildeten intermetallischen Phasen (IMP) im System Aluminium und Kupfer (Kapitel 8.5) beeinflusst. Diese IMP haben eine höhere Härte und sind in der Regel spröde (Tabelle 4.5) [38]. Infolge der unterschiedlichen thermischen Dehnung der stromführenden Leiter und der metallischen Überzüge könnte sich die Beschichtung vom Leiter lösen (Bild 4.5) und damit den Verbindungswiderstand erhöhen.

### 8.2.2 Zeit- und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit des Ni-P (Typ 5)

Bei einem metallischen Überzug aus einer autokatalytisch abgeschiedenen Ni-P-Legierung kann durch eine Wärmebehandlung nach dem galvanischen Beschichten, die Haftfestigkeit auf dem Substrat und die Härte durch eine Ausscheidungshärtung erhöht werden [N12]. Die Besonderheit bei einem Überzug aus Ni-P (Typ 5) ist die amorphe Mikrostruktur im abgeschiedenen Zustand (Tabelle 2.7). Durch die Wärmebehandlung verändert sich das amorphe Gefüge in ein kristallines [3], [20], [22]. In der Literatur wird für die Umwandlung eine Temperatur von 200 °C angegeben [22]. Die Härte der Schicht hat sich bereits ab einer Temperatur von 115 °C nach einer Zeit von 10.000 h erhöht (Bild 8.6). Zum Untersuchen der Auswirkungen durch die Gefügeänderung im Überzugwerkstoff auf das elektrische Kontaktverhalten von Verbindungen mit vernickelten Stromschienen wurde die elektrische Leitfähigkeit eines metallischen Überzugs aus Ni-P (Typ 5) bestimmt. Es wurde ein metallischer Überzug aus Ni-P (Typ 5) auf Substratstreifen abgeschieden, von denen dieser nachträglich mechanisch abgelöst wurde (Bild 8.7 a)).

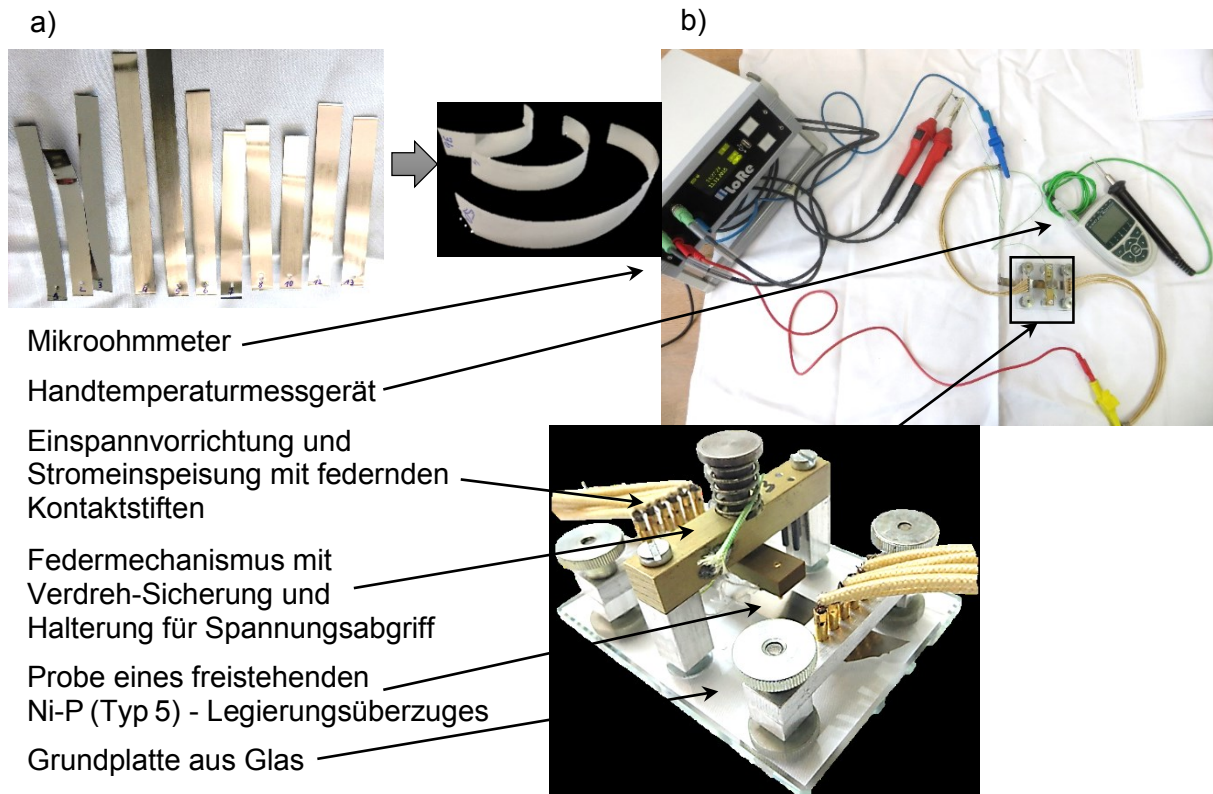


Bild 8.7: a) Proben, b) Versuchsaufbau, c) Messeinrichtung für das Bestimmen der elektrischen Leitfähigkeit dünner Schichten nach der Vier-Leiter-Messmethode [38]

Anschließend wurde der Materialwiderstand nach der Vier-Leiter-Messmethode mit einem Mikrohmmeter (Bild 8.7 b)) und einer speziellen Versuchsanordnung (Bild 8.7 c)) [38] gemessen. Die einzelnen Proben hatten eine Dicke von (28 ... 30)  $\mu\text{m}$ . In der Messanordnung wurde an diesen Proben die Potentialdifferenz über einen Abschnitt von 12,8 mm x 20 mm bei einem definierten Strom bestimmt. Es wurde der Materialwiderstand im Ausgangszustand und abhängig von der Zeit bei einer Temperatur von 20 °C an Proben ermittelt, die im Wärmeschrank bei einer Temperatur von 220 °C gelagert wurden. Aus dem gemessenen Materialwiderstand und den Abmessungen der Probe wurde die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa_{20}$  und der spezifische elektrische Widerstand  $\rho_{20}$  des metallischen Überzugwerkstoffs Ni-P (Typ 5) berechnet (Tabelle 8.3).

Tabelle 8.3: Elektrische Leitfähigkeit  $\kappa_{20}$  und spezifischer elektrischer Widerstand  $\rho_{20}$  des metallischen Überzugwerkstoffs Ni-P (Typ 5) abhängig von der Mikrostruktur im abgeschiedenen Zustand und nach der Wärmebehandlung

Zeit in h bei 220 °C	Elektrische Leitfähigkeit $\kappa_{20}$ in $\text{MS m}^{-1}$					Spezifischer elektrischer Widerstand $\rho_{20}$ in $\mu\Omega\text{cm}$
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittelwert	Mittelwert
0	0,95	0,98	0,95	0,95	0,96	104,2
310	0,96	0,98	-	-	0,97	103,1
1.550	1,07	1,09	-	-	1,08	92,6
4.150	1,82	Probe gebrochen	-	-	1,82	54,9
17.000	1,94	-	-	-	1,94	51,5

Die elektrische Leitfähigkeit eines metallischen Überzugs aus Ni-P (Typ 5) im abgeschiedenen Zustand ist mit  $\kappa_{20} = 0,96 \text{ MS m}^{-1}$  mehr als 65-mal geringer als die von Silber. Nach dem Lagern der Proben über 1.550 h bei 220 °C hat sich die elektrische Leitfähigkeit bereits um 12,5 % und nach 17.000 h um 202 % erhöht (Tabelle 8.3). Basierend auf diesen Ergebnissen führt eine Änderung der Mikrostruktur vom amorphen zum kristallinen Zustand zu einer deutlich höheren elektrischen Leitfähigkeit. Für Schraubenverbindungen mit Stromschienen und metallischen Überzügen aus Ni-P (Typ 5) bedeutet das, dass während des Betriebs eine höhere elektrische Leitfähigkeit der Mikrokontakte zwischen den Überzugwerkstoffen zu einem geringeren Verbindungswiderstand führen müsste.

### 8.3 Kraftabbau an Schraubenverbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen

In den Langzeitversuchen an stromführenden Verbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Aluminium (Tabelle 8.1) wurden je Beschichtungsvariante und Temperatur zwei Verbindungen mit Kraftmesseinrichtungen (Kapitel 6.4, Bild 6.6) montiert. Bei den Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) wurde im Vergleich zu den Versuchen bei einer Temperatur von 115 °C eine niedrigere mittlere Kontaktkraft  $F_K$  für Verbindungen bestimmt, die bei einer Temperatur von 140 °C thermisch beansprucht wurden (Bild 8.8).

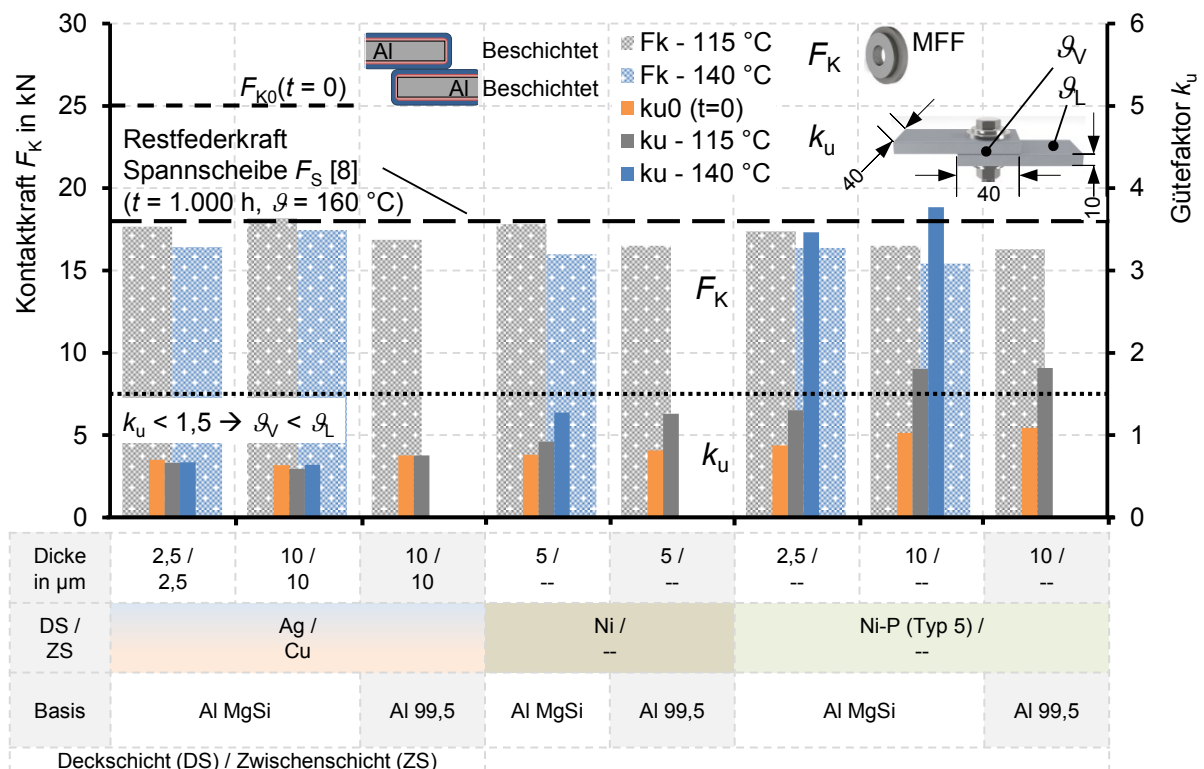


Bild 8.8: Kontaktkraft  $F_K$  und mittlerer Gütefaktor  $k_u$  von stromführenden Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6 nach 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C

Die Kontaktkraft  $F_K$  hat sich an den stromführenden Verbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen nach einer Zeit von  $t = 25.000$  h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C auf einen resultierenden Wert von  $F_K \geq 15,5$  kN abgebaut. Damit wurde die Mindestkontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN (Kapitel 8.1) für keine der Beschichtungsvarianten unterschritten. An den Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei beschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) und den metallischen Überzügen aus Silber, elektrolytisch abgeschiedenem Ni und autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) wurde eine mittlere Kontaktkraft von  $F_K = (16,3 \dots 16,9)$  kN nach einer Zeit von  $t = 25.000$  h bei einer Temperatur von 115 °C bestimmt (Bild 8.8). Diese resultierende Kontaktkraft ist nahezu gleich mit dem Wert von  $F_K \approx 17$  kN für Schraubenverbindungen (MFF) mit unbeschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) für die gleiche Versuchszeit und Temperatur (Bild 7.27). Damit konnte kein Einfluss des metallischen Überzugs der Stromschienen auf den Abbau der Kontaktkraft in der Schraubenverbindung mit federnden Fügeelementen (MFF) beobachtet werden.

Bis zu einer Versuchszeit von  $t = 25.000$  h erhöhten sich die Gütefaktoren  $k_u$  für Verbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen (Bild 8.3, Bild 8.8). An Verbindungen mit zwei identisch beschichteten Stromschienen wurden insbesondere für einen metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) die höchsten mittleren Gütefaktoren von  $k_u = (3 \dots 5)$  (Bild 8.3) bei einer Temperatur von 140 °C bestimmt. Stromführende Schraubenverbindungen (MFF) mit Stromschienen dieser Abmessungen sind unter realen Bedingungen bei Belastung mit dem Bemessungsstrom deutliche Heißstellen. Diese Verbindungen altern dadurch beschleunigt und sind als nicht langzeitstabil zu bewerten. Basierend auf den Ergebnissen zur resultierenden Kontaktkraft, mit Werten größer als die Mindestkontaktkraft, sind die höheren Gütefaktoren für Verbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen nicht ausschließlich auf den Abbau der Kontaktkraft zurückzuführen. Zum Bestimmen des dominanten Alterungsmechanismus wurden weitere experimentelle Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und vernickelten Stromschienen aus Aluminium durchgeführt (Kapitel 8.5, Kapitel 8.6).

#### **8.4 Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene**

Es sind die Mittelwerte und Einzelwerte der Gütefaktoren  $k_u$  für die untersuchten Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und je einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium dargestellt. Für den Zustand der Verbindungen unmittelbar nach der Montage ( $t = 0$ ) ist nur der Mittelwert des Gütefaktors  $k_{u0}$  angegeben. Zur besseren Übersicht und vollständigen Darstellung aller Versuchsergebnisse wurden zwei Diagramme mit unterschiedlichen Wertebereichen an der Ordinatenachse erstellt. Alle Schraubenverbindungen wurden stromlos im Wärmeschrank bei 115 °C und 140 °C für eine Zeit von  $t = 25.000$  h gelagert.

Bereits nach einer Versuchszeit von  $t \approx 2.500$  h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C wurden Gütefaktoren von  $k_u > 1,5$  für alle Schraubenverbindungen mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium bestimmt [72]. Die Gütefaktoren dieser Verbindungen erhöhten sich stetig bis zu einer Versuchszeit nach 25.000 h (Bild 8.9, Bild 8.10). Damit sind diese Verbindungen als nicht langzeitstabil zu bewerten.

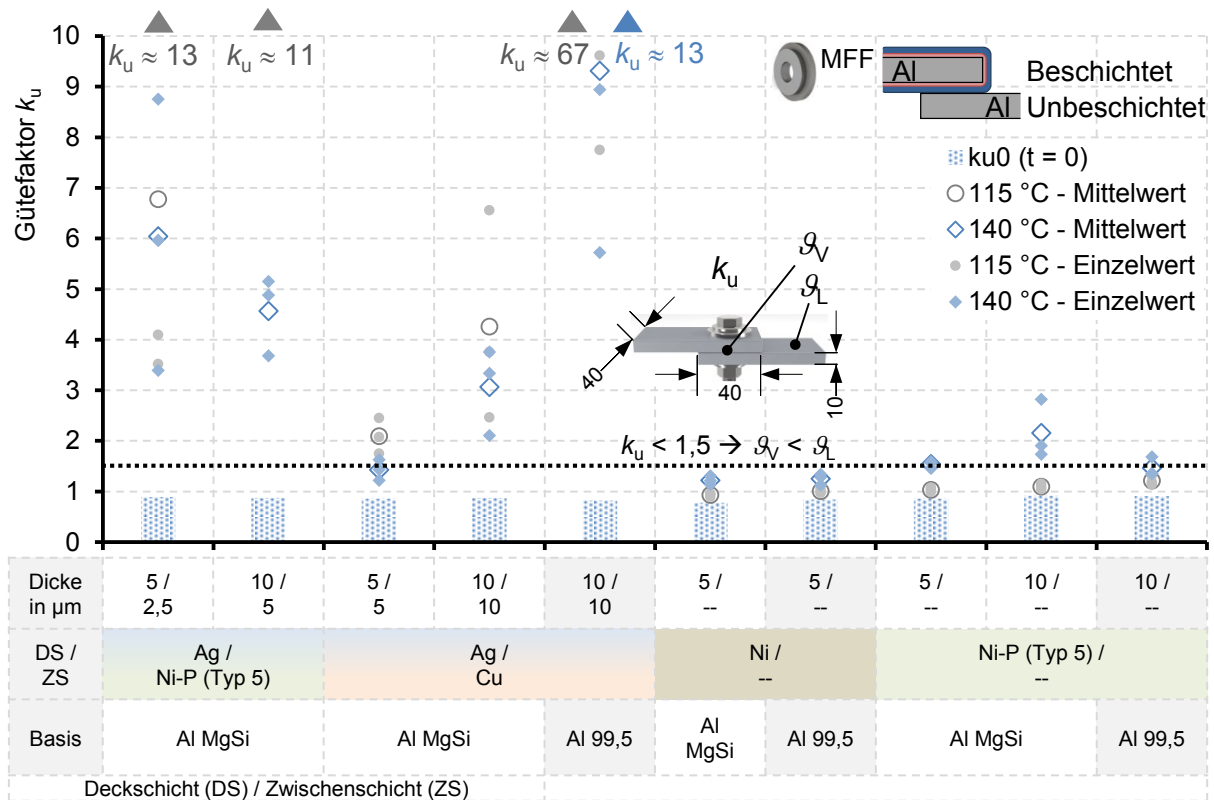


Bild 8.9: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromlos im Wärmeschrank über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gelagert

An den Schraubenverbindungen mit einer versilberten Stromschiene wurden die hohen Werte des Gütefaktors unabhängig vom Werkstoff der Zwischenschicht aus elektrolytisch abgeschiedenem Cu oder autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) ermittelt. Es konnte anhand der Messwerte kein direkter Einfluss durch die Temperatur auf das Langzeitverhalten der Verbindungen festgestellt werden. Einzelne Verbindungen, die bei einer Temperatur von 115 °C im Wärmeschrank gelagert wurden, hatten höhere Gütefaktoren als Verbindungen bei einer Temperatur von 140 °C.

Die hohen Verbindungswiderstände und damit auch Gütefaktoren für Verbindungen mit einem versilberten Leiter und einem unbeschichteten Leiter aus Aluminium werden auf die Diffusion von Sauerstoff, durch den metallischen Überzug aus Silber hindurch, zurückgeführt (Kapitel 4.3.1), [37], [38], [72], [73], [74], [75]. Der Sauerstoff diffundiert durch die Silberdeckschicht des beschichteten Kontaktpartners und lagert sich an den Mikrokontakten auf der Oberfläche des unbeschichteten Leiters aus Aluminium an. Dadurch bilden sich Aluminiumoxidschichten auf der Kontaktfläche des unbeschichteten Aluminiums. Durch die Aluminiumoxidschicht, mit einem sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstand (Tabelle 4.2), erhöhen sich der Kontakt- und Verbindungswiderstand der Verbindungen.



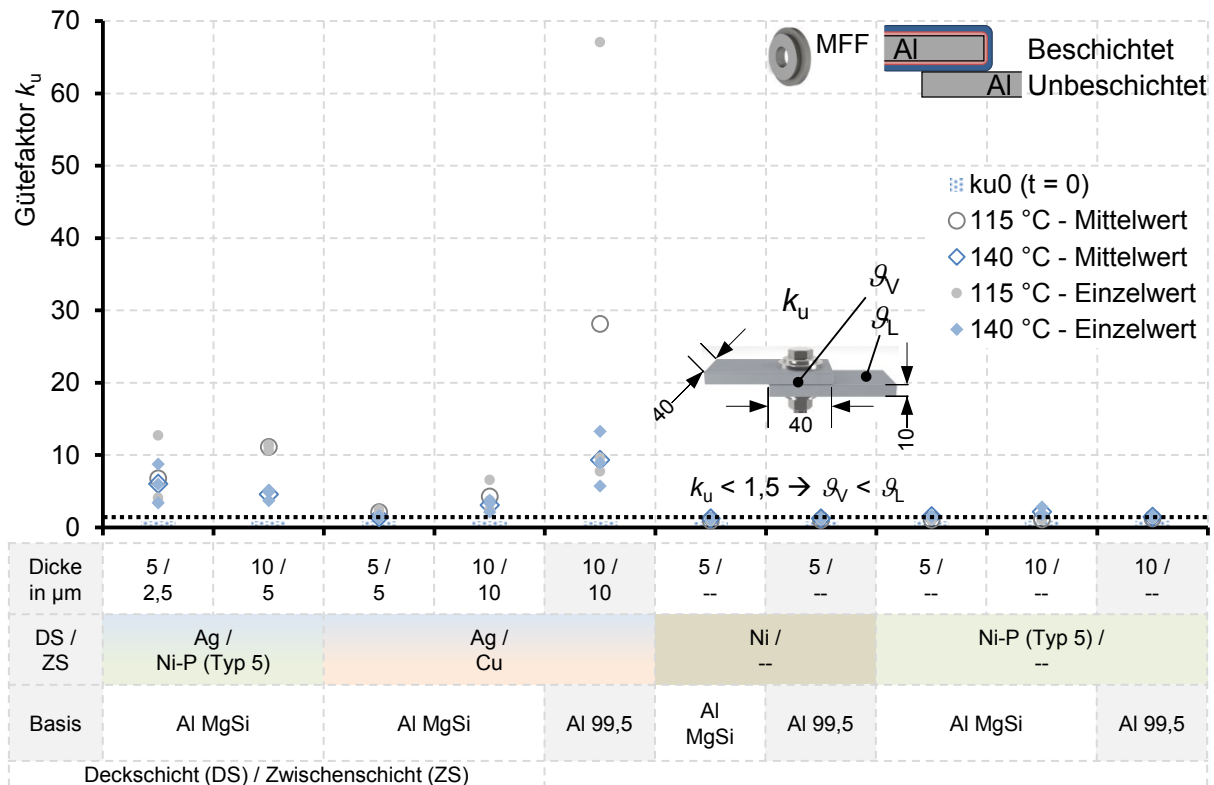


Bild 8.10: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromlos im Wärmeschrank über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gelagert

Bei Schraubenverbindungen mit einer vernickelten Stromschiene und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium wurden für eine Betriebstemperatur von 115 °C konstant niedrige Gütefaktoren bestimmt. Für eine Temperatur von 140 °C erhöhen sich die Werte nur geringfügig im Vergleich zu den Verbindungen mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium. Dabei sind die Werte für einen metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) höher als für elektrolytisch abgeschiedenes Ni. Das gute Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit einem vernickelten und einem unbeschichteten Leiter aus Aluminium wurde bereits in [77] dokumentiert (Kapitel 4.3.2). Das plastische Verformen der Mikrospitzen der unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium führt beim Verschrauben zu stabileren stromführenden Mikrokontakten (Bild 4.7 a)). Nach [77] umschließt das verformte Aluminium die Mikrospitzen aus Nickel und fixiert den Kontakt auch im erwärmten Zustand langfristig stabil (Bild 4.7 b)). Das bessere Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene wurde auch in diesen experimentellen Untersuchungen im Vergleich zu Verbindungen mit einem Kontakt zwischen zwei vernickelten Stromschienen (Kapitel 8.2, Bild 8.3) ermittelt. Nur für die Schraubenverbindungen mit Stromschienen und einem metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) mit einer Schichtdicke von 10  $\mu\text{m}$  wurden Gütefaktoren  $k_u > 1,5$  bestimmt. Damit erwärmen sich die Verbindungen bei konstanter Strombelastung stärker als die angeschlossenen Leiter. Die ermittelten Gütefaktoren sind aber noch nicht als kritisch zu betrachten. Der Grenzgütefaktor von  $k_{u,\text{Grenz}} = 7,0$  wurde nicht erreicht (Kapitel 3.2) [36].

## 8.5 Mikroskopische Untersuchungen

Um das Altern der Schraubenverbindungen mit vernickelten und versilberten Stromschienen durch Interdiffusion (Kapitel 4.3) untersuchen zu können, wurden mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es die höheren Gütefaktoren der Schraubenverbindungen in den Langzeitversuchen nach einer Zeit von  $t = 25.000$  h (Kapitel 8.2 und 8.4) durch das Wachsen von intermetallischen Phasen (IMP) in den Systemen Al - Ni, Al - Cu und Al - Ag (Tabelle 4.5) nachzuweisen. Zum Bestätigen der Alterung durch Interdiffusion wurden nachweisbar dicke Phasen im metallografischen Querschliff erwartet.

Um den stoffschlüssigen Bereich zwischen dem metallischen Überzug und dem Leiter aus Aluminium zu betrachten, wurden Proben von einer beschichteten Stromschiene vor der Lagerung im Wärmeschränk mit einem Wasserstrahlschneidgerät<sup>35</sup> abgeschnitten und nach einer bestimmten Zeit untersucht (Bild 8.4 a), b)). Für die mikroskopischen Untersuchungen in der Trennfuge zwischen zwei Stromschienen wurden metallografische Querschliffe an Proben angefertigt, die aus einer Schraubenverbindung mit Stromschienen herausgeschnitten wurden. Um bei diesen mikroskopischen Untersuchungen gezielt einen Kontaktpunkt zwischen beiden Stromschienen betrachten zu können, wurden zwei Stromschienen mit einer um  $90^\circ$  zueinander versetzt gerillten Kontaktfläche (Bild 6.1 a)) verschraubt. Der Schnitt wurde nahe des Bohrlochs in einem Bereich durchgeführt, indem die größten Mikrokontakte durch die hohe mechanische Spannung im Druckkegel der Schraube entstehen (Bild 8.11).

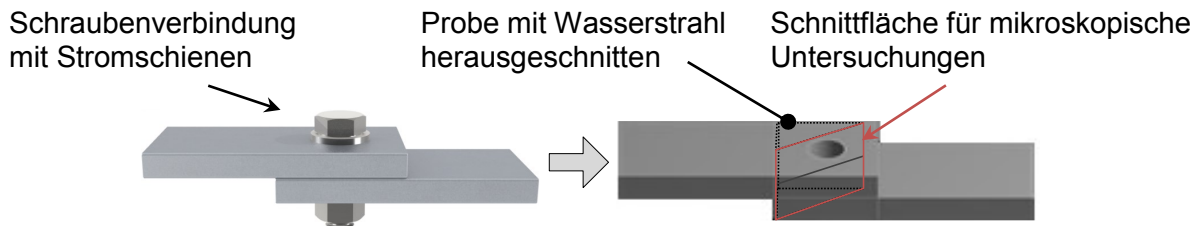


Bild 8.11: Mit einem Wasserstrahl geschnittene Probe aus einer thermisch belasteten Schraubenverbindung mit Stromschienen und gerillten Kontaktflächen

Um zunächst das Bilden von IMP in den Systemen Al - Ni, Al - Cu und Al - Ag (Tabelle 4.5) nachweisen zu können, wurden die mikroskopischen Untersuchungen an Proben im Zustand nach der Anlieferung mit denen nach einer Zeit von  $t = 10.000$  h im Wärmeschränk bei einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$ , verglichen. Durch die höhere Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  im Vergleich zu den maximalen Betriebstemperaturen von  $(115 \dots 140)^\circ\text{C}$  der Schraubenverbindungen in den Langzeitversuchen (Bild 8.3, Bild 8.9) wurde damit die Diffusionsgeschwindigkeit zum Bilden dicker IMP erhöht.

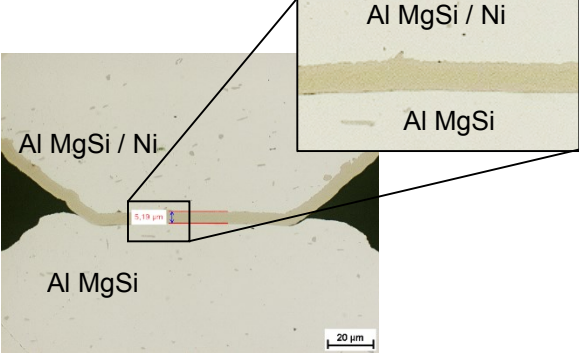
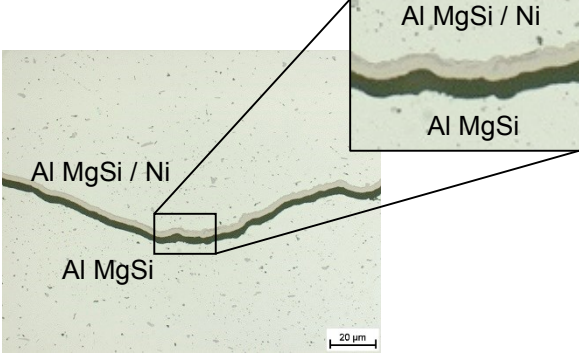
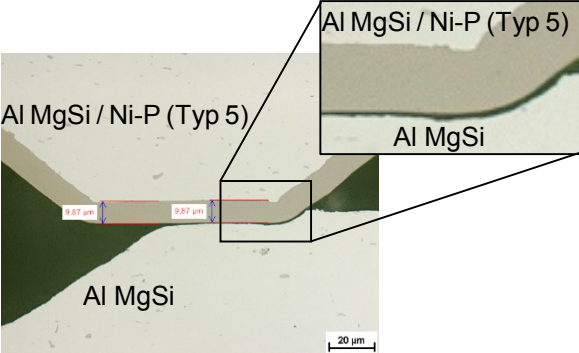
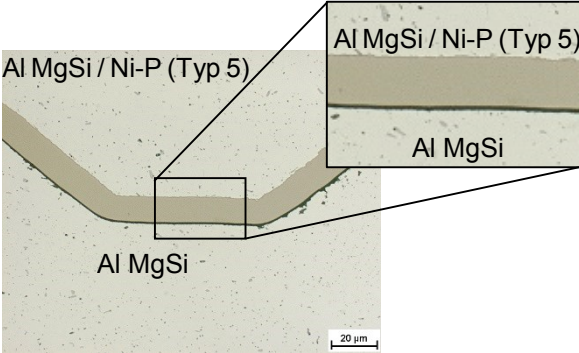
Die mikroskopischen Untersuchungen wurden am Institut für Werkstoffwissenschaften (IfWW) der TU Dresden und am Forschungsinstitut Edelmetalle+Metallchemie (fem) in Schwäbisch Gmünd an Proben durchgeführt, die aus Schraubenverbindungen mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6 herausgeschnitten wurden. Betrachtet wurden die Berührungsstellen zwischen unbeschichtetem Al MgSi und den verschiedenen metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni (Tabelle 8.4 a)), auto-

<sup>35</sup> Vermindern von Reibungswärme in der Trennzone zum Verhindern von Gefügeveränderungen



katalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) (Tabelle 8.4 b)), sowie Ag aus der Deckschicht mit einer Zwischenschicht aus Cu, die beide elektrolytisch abgeschieden wurden (Tabelle 8.5).

Tabelle 8.4: Kontaktpunkt in einer Schraubenverbindung mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6 und gerillter Kontaktfläche

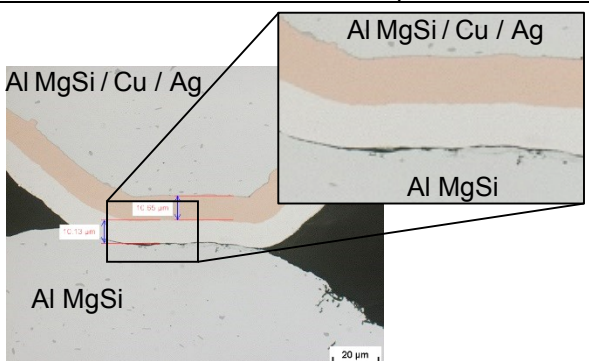
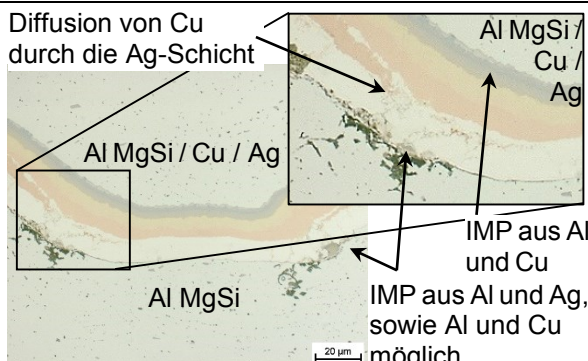
a) Kontaktpunkt zwischen einer unbeschichteten und einer beschichteten Stromschiene aus Al MgSi mit einem metallischen Überzug aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni	
Montierter Zustand bei Raumtemperatur	Zeit $t = 10.000$ h im Wärmeschränk bei $220\text{ °C}$
	
Metallischer Überzug aus Ni ist konturentreu und hat keine Einschlüsse	Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni nachweisbar
b) Kontaktpunkt zwischen einer unbeschichteten und einer beschichteten Stromschiene aus Al MgSi mit einem metallischen Überzug aus autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5)	
Montierter Zustand bei Raumtemperatur	Zeit $t = 10.000$ h im Wärmeschränk bei $220\text{ °C}$
	
Metallischer Überzug aus Ni-P (Typ 5) ist konturentreu und hat keine Einschlüsse	Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni-P (Typ 5) nachweisbar

Beim Schneiden der Proben mittels Wasserstrahl wurden teilweise die zuvor mechanisch kontaktierten Bereiche getrennt und in den mikroskopischen Untersuchungen ist ein Spalt erkennbar. Durch die plastische Verformung des Kontaktpunktes konnten die mechanisch kontaktierten Bereiche dennoch einander zugeordnet und betrachtet werden. Im Kontaktpunkt zwischen den gerillten, unbeschichteten Stromschienen und den gerillten, vernickelten Stromschienen aus Al MgSi-T6 mit metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni (Tabelle 8.4 a)) sowie autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) (Tabelle 8.4 b)) konnten keine IMP nachgewiesen werden. Weiterhin wurden auch an dem stoffschlüssigen Bereich zwischen den metallischen Überzügen und dem Leiterwerkstoff keine IMP gefunden.

Die Diffusion (Kapitel 4.3) ist ein thermisch aktivierter physikalischer Vorgang bei dem sich die Diffusionsgeschwindigkeit mit der homologen Temperatur<sup>36</sup> der betrachteten Werkstoffe erhöht. Metallische Überzüge aus Ni und Ni-P (Typ 5) (Tabelle 2.7) haben eine verhältnismäßig hohe Schmelztemperatur im Vergleich zu Aluminium (Tabelle 2.2). Damit ist die Diffusionsgeschwindigkeit sehr gering, sodass IMP im System Al - Ni erst bei sehr hohen Temperaturen und nach langer Zeit wachsen. Bei den Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen und denen mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene werden in den Langzeitversuchen (Kapitel 8.2 und 8.4) keine IMP mit einer nachweisbaren Dicke erwartet (vgl. Tabelle A. 4). Die hohen Gütefaktoren nach kurzer Zeit, insbesondere bei Schraubenverbindungen mit zwei beschichteten Stromschienen und einem metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) sind damit nicht durch den Alterungsmechanismus der Interdiffusion und wachsenden, schlecht elektrisch leitfähigen IMP im System Al - Ni (Tabelle 4.5) zu erklären.

Bei versilberten Stromschienen mit einer Zwischenschicht aus Kupfer wurden nach einer Zeit von  $t = 10.000$  h bei einer Temperatur von  $220\text{ °C}$  starke Veränderungen am Schichtaufbau deutlich. An dem stoffschlüssigen Bereich zwischen dem Leiterwerkstoff Al MgSi und der Zwischenschicht aus Kupfer haben sich mehrere IMP gebildet. Durch die unterschiedlichen Grauschattierungen wurden drei IMP im System Al - Cu zugeordnet (Tabelle 8.5, Bild 8.12).

Tabelle 8.5: Kontaktpunkt in einer Schraubenverbindung mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6 und gerillter Kontaktfläche

Kontaktpunkt zwischen einer unbeschichteten und einer versilberten Stromschiene aus Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Kupfer	
Montierter Zustand bei Raumtemperatur	Zeit $t = 10.000$ h im Wärmeschränk bei $220\text{ °C}$
 <p>Metallischer Überzug aus Cu / Ag ist konturentreu und hat keine Einschlüsse</p>	 <p>IMP in den System Al - Cu und Al - Ag, sowie Diffusion von Cu durch die Deckschicht aus Ag</p>

In [38] wurde anhand von mikroskopischen Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und Kupfer geschlussfolgert, dass bei den üblichen Betriebstemperaturen in der Elektroenergie-technik nur die  $\text{Al}_2\text{Cu}$ -Phase, die  $\text{AlCu}$ -Phase und die  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ -Phase (Tabelle 4.5) entstehen. Die gelbe Schicht wurde als Bereich mit einem Mischkristall aus Al - Cu und nicht als IMP bestimmt (vgl. Bild 8.12).

<sup>36</sup> Die homologe Temperatur ist das Verhältnis aus der betrachteten absoluten Temperatur in Kelvin zur absoluten Schmelztemperatur des Werkstoffs in Kelvin.



Bild 8.12: Mikroskopische Untersuchungen an einem für eine Zeit von  $t = 10.000$  h bei einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  im Wärmeschrank gelagertem Abschnitt einer versilberten Stromschiene aus Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Kupfer

Weiterhin wurde im Kontaktpunkt an der Trennfuge zwischen dem metallischen Überzug aus Silber und der unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi weitere IMP sichtbar (Tabelle 8.5). Die chemische Zusammensetzung dieser IMP wurde nicht bestimmt. Es ist zu erwarten, dass sich bei dieser thermischen Belastung in den Systemen Al - Ag zwischen der unbeschichteten und der versilberten Stromschiene aus Aluminium, sowie im System Al - Cu IMP gebildet haben. Im Kontaktpunkt zwischen einer unbeschichteten und einer versilberten Stromschiene aus Al 99,5 wurde in [37] die  $\delta$ -Phase ( $\text{Ag}_2\text{Al}$ ) nach einer Zeit von 14.000 h im Wärmeschrank mit einer Hochtemperaturphase von 10.100 h bei einer Temperatur von  $180^\circ\text{C}$  bestimmt. Zwischen Kupfer und Silber bilden sich keine IMP. Im binären Phasendiagramm von Cu - Ag existieren zwei Mischkristallphasen in denen Atome des jeweils anderen Systempartners gelöst werden können. [82] Bei den mikroskopischen Untersuchungen wurde aber die Interdiffusion von Kupfer aus der Zwischenschicht durch die Deckschicht aus Silber beobachtet (Tabelle 8.5). Die Diffusion des Kupfers entlang der Korngrenzen des Silbers wurde an zwei weiteren Proben sichtbar. Diese Proben wurden im Wärmeschrank bei einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  für eine Zeit von 10.000 h (Bild 8.12) und 15.000 h (Bild 8.13) gelagert.

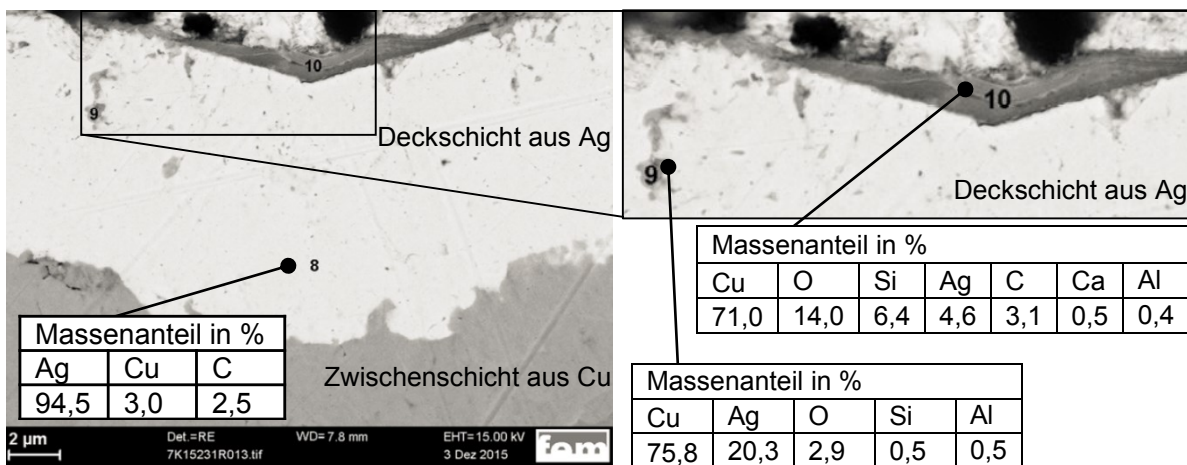


Bild 8.13: Mikroskopische Untersuchungen an einem für eine Zeit von 15.000 h bei einer Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  im Wärmeschrank gelagertem Abschnitt einer versilberten Stromschiene aus Al 99,5(A) mit einer Zwischenschicht aus Kupfer sowie die chemische Zusammensetzung einzelner untersuchter Bereiche mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) im Rasterelektronenmikroskop



Das Kupfer aus der Zwischenschicht des metallischen Überzugs ist durch die Deckschicht aus Silber diffundiert und hat auf der Oberfläche der versilberten Stromschiene eine schwarze Anlaufschicht gebildet (Bild 8.12, Tabelle 8.6). Mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) wurde die chemische Zusammensetzung einzelner Bereiche in dem metallischen Überzug und an der Oberfläche vom Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie (fem) in Schwäbisch Gmünd bestimmt (Bild 8.13).

Die Massenanteile an Cu von 71 % und O von 14 % im analysierten Teilbereich an der Oberfläche der versilberten Stromschiene deuten auf eine Kupfer(I)-Oxidschicht  $\text{Cu}_2\text{O}$  hin, die sich bei Luftatmosphäre mit typischen Sauerstoffpartialdruck und einer Temperatur bis 260 °C bilden kann [8], [42], [83]. Ein hoher Massenanteil an Cu von 75,8 %, der in einem Teilbereich in der Mitte des metallischen Überzugs aus Silber bestimmt wurde, deutet darauf hin, dass das Kupfer aus der Zwischenschicht durch die Deckschicht aus Silber diffundiert ist.

In [42] wurden an versilberten Kupferplatten mit einer Deckschicht aus Silber und einer Schichtdicke von 6 µm nach einer Zeit von 10.000 h bei einer Temperatur von 180 °C ebenfalls schwarze Anlaufschichten beobachtet. Bei den Schraubenverbindungen mit versilberten Stromschienen aus Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Kupfer wurden nach der Lagerung im Wärmeschränk bei Temperaturen von (140 und 220) °C abhängig von der Schichtdicke der Deckschicht aus Silber unterschiedlich starke Verfärbungen sichtbar (Tabelle 8.6).

Tabelle 8.6: Schwarze Anlaufschichten auf metallischen Überzügen aus Silber mit einer Zwischenschicht aus Kupfer

Oberfläche von Schraubenverbindungen mit versilberten Stromschienen aus Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Kupfer nach unterschiedlichen thermischen Belastungen im Wärmeschränk		
Stromschiene: Al MgSi Zwischenschicht: Cu (2,5 µm) Deckschicht: Ag (2,5 µm)  Thermische Belastung: 220 °C nach 10.000 h		
Stromschiene: Al MgSi Zwischenschicht: Cu (2,5 µm) Deckschicht: Ag (2,5 µm)  Thermische Belastung: 140 °C nach 15.000 h	Stromschiene: Al MgSi Zwischenschicht: Cu (5,0 µm) Deckschicht: Ag (5,0 µm)  Thermische Belastung: 140 °C nach 15.000 h	Stromschiene: Al MgSi Zwischenschicht: Cu (10,0 µm) Deckschicht: Ag (10,0 µm)  Thermische Belastung: 140 °C nach 15.000 h
		

Die schwarzen Anlaufschichten auf der Oberfläche von versilberten Stromschienen aus Aluminium mit einer Zwischenschicht aus Kupfer haben den Gütefaktor der Schrauben-

verbindungen mit zwei versilberten Stromschienen in den Langzeitversuchen nicht erhöht (Bild 8.3). Im Bereich des Druckkegels der Schraube hat der Kraftschluss zwischen den Stromschienen das Eindringen einer großen Menge an Sauerstoff bis in die stromführenden Mikrokontakte verhindert, sodass sich dort keine durchgehende Oxidschicht bilden konnte. Nach dem Öffnen der Schraubenverbindungen waren die Kontaktflächen metallisch blank. Das Bilden von dünnen IMP im System Al - Cu im stoffschlüssigen Bereich zwischen dem Leiter und der Zwischenschicht wird bei Schraubenverbindungen mit zwei versilberten Stromschienen aus Aluminium und einer Zwischenschicht aus Kupfer erwartet. Sehr dünne IMP wurden an Proben beobachtet, die für eine Zeit von 10.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C im Wärmeschrank gelagert wurden (Tabelle A. 4). Diese flächig gewachsenen IMP führen nicht zu erhöhten Gütefaktoren von Schraubenverbindungen mit zwei versilberten Stromschienen in den Langzeitversuchen (Bild 8.3) und wurden als alleiniger Alterungsmechanismus ausgeschlossen [38].

Die hohen Gütefaktoren von Schraubenverbindungen mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium (Bild 8.9, Bild 8.10) sind ebenfalls nicht ausschließlich durch die gebildete IMP im System Al - Ag zu erklären. Modellrechnungen [38] im Vergleich zu den Ergebnissen aus Langzeitversuchen (Bild 8.9, Bild 8.10), [37], [38] und der Menge an IMP, die in mikroskopischen Untersuchungen gefunden wurde (Tabelle 8.5) [37], erklären nicht die hohen Gütefaktoren der Schraubenverbindungen nach der kurzen Betriebszeit bei (115 und 140) °C. Für diese Verbindungen wird ein Einfluss durch die Diffusion von Sauerstoff durch das Silber und einer anschließend wachsenden Oxidschicht auf dem Aluminium vermutet (Kapitel 4.3), [37], [38], [72], [75].

## **8.6 Weitere Untersuchungen zur Alterung von Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen**

Die Ergebnisse aus den Langzeitversuchen (Kapitel 8.2 ... Kapitel 8.4) an Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit vernickelten Stromschienen und die mikroskopischen Untersuchungen zu den gebildeten intermetallischen Phasen (IMP) im System Al - Ni (Kapitel 8.5) reichen nicht aus um das Altern dieser Verbindungen vollständig zu erklären.

An Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium wurden nach einer Zeit von  $t = 25.000$  h zum Teil deutlich höhere Gütefaktoren  $k_u \gg k_{u0}$ , insbesondere für die höhere Betriebstemperatur von 140 °C (Bild 8.3), im Vergleich zum Zustand nach der Montage  $k_{u0}$  bestimmt. Im Gegensatz dazu wurde an Schraubenverbindungen (MFF) mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium ein deutlich besseres elektrisches Kontakt- (Kapitel 8.1) und Langzeitverhalten (Bild 8.9) ermittelt.

In den Langzeitversuchen führten metallische Überzüge aus elektrolytisch abgeschiedenem Nickel tendenziell zu einem besseren Langzeitverhalten der Verbindungen als metallische Überzüge aus autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) (Bild 8.3, Bild 8.9). Das Altern der stromdurchflossenen und im Wärmeschrank gelagerten Verbindungen zeigte bei den Langzeitversuchen keinen Unterschied (Bild 8.3). Die Elektromigration (Tabelle 4.1) ist damit nicht der dominierende Alterungsmechanismus. Durch die federnden Fügeelemente wurde bei den Schraubenverbindungen (MFF) mit Stromschienen aus Aluminium der Kraftabbau

deutlich reduziert (Kapitel 7.2.3, Kapitel 8.3). Die Mindestkontaktkraft von  $F_{K,min} = (5 \pm 2)$  kN wurde nicht unterschritten, sodass das Altern der Verbindungen nicht nur durch den Abbau der Kontaktkraft zu erklären ist. Bei den mikroskopischen Untersuchungen an metallografischen Querschliffen von vernickelten Stromschienen wurden nach einer Zeit von  $t = 10.000$  h bei einer viel höheren Temperatur von  $220^\circ\text{C}$  keine IMP im System Al - Ni beobachtet (Tabelle 8.4, Tabelle A. 4).

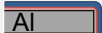

Der Einfluss von flächigen IMP am stoffschlüssigen Bereich zwischen Leiter und dem metallischem Überzug ist geringer als im Mikrokontakt [38]. Damit wurden entgegen der Ergebnisse in den Langzeitversuchen höhere Gütefaktoren für Schraubenverbindungen (MFF) mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium (Bild 8.9) im Vergleich zu Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen (Bild 8.3) nach einer Versuchszeit von  $t = 25.000$  h erwartet. Zusammenfassend deuten diese Ergebnisse daraufhin, dass die Interdiffusion ebenfalls nicht der dominierende Alterungsmechanismus für Schraubenverbindungen mit vernickelten Stromschienen aus Aluminium ist.

Das Ziel der weiteren Versuche war es, dass unterschiedliche Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei beschichteten Stromschienen und metallischen Überzügen mit einer kristallinen und einer amorphen Mikrostruktur zu untersuchen (Kapitel 8.6.1). Weiterhin wurde der Einfluss von Versatzbewegungen durch die thermische Dehnung der Werkstoffe in Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Al MgSi auf das elektrische Kontaktverhalten der Verbindungen bestimmt (Kapitel 8.6.2).

#### 8.6.1 Einfluss des Phosphorgehaltes in metallischen Überzügen aus Ni-P

Das Ni-P (Typ 5) mit einem hohen Massenanteil an Phosphor  $> 10\%$  hat eine amorphe und damit keine regelmäßige Kristallstruktur (Tabelle 2.7, Kapitel 2.2.2). Überzüge mit einem niedrigen Massenanteil an Phosphor, sowie elektrolytisch abgeschiedenes Ni haben dagegen ein kristallines Gefüge. Um diesen Einfluss auf das elektrische Kontaktverhalten in Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Al 99,5(A) untersuchen zu können, wurden vergleichende Langzeitversuche an metallischen Überzügen aus Ni-P mit unterschiedlichen Massenanteilen an Phosphor durchgeführt. Es wurden Überzüge mit einem niedrigen Massenanteil an P von  $3\%$  im Ni-P (Typ 2) bis zu einem hohen Massenanteil an P von  $10,6\%$  im Ni-P (Typ 5) untersucht (Tabelle 8.7).

Tabelle 8.7: Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen und metallischen Überzügen aus Ni-P mit unterschiedlichen Massenanteilen an Phosphor (Tabelle 2.7)

Kontakt:  Beschichtet  Beschichtet		Metallische Überzüge aus Ni-P mit unterschiedlichem Massenanteil an Phosphor (Festlegung durch den Typ [N12]) Langzeitversuche bei 115 °C und 140 °C			
		Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5 (Bild 8.3)
Massenanteil an P in % (Tabelle 2.7)		≈ 3,0	≈ 4,5	≈ 9,0	≈ 10,6
Dicke der Ni-P-Schicht in µm		≈ 6,0	≈ 15,0	≈ 14,0	≈ 11,4
Art der Langzeitversuche:		Wärmeschränk / Anzahl der gelagerten Schraubenverbindungen			
Leiterwerkstoff	Al 99,5(A)	5	3	5	3

Die Langzeitversuche wurden an stromlos in Wärmeschränken gelagerten Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) bei einer Temperatur von (115 und 140) °C durchgeführt. Die Kontaktflächen der vernickelten Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 (Tabelle 6.1, Tabelle 6.2, Tabelle 6.3) wurden identisch zu denen in den Langzeitversuchen (Kapitel 8.2) vorbehandelt (Tabelle 6.4) und zu Schraubenverbindungen montiert (Kapitel 6.3).

Nach der Montage wurden an allen Schraubenverbindungen, abhängig vom Typ des metallischen Überzugs aus Ni-P, Gütefaktoren von etwa  $k_{u0} \approx 1,0$  bestimmt (Bild 8.14, Bild 8.15).

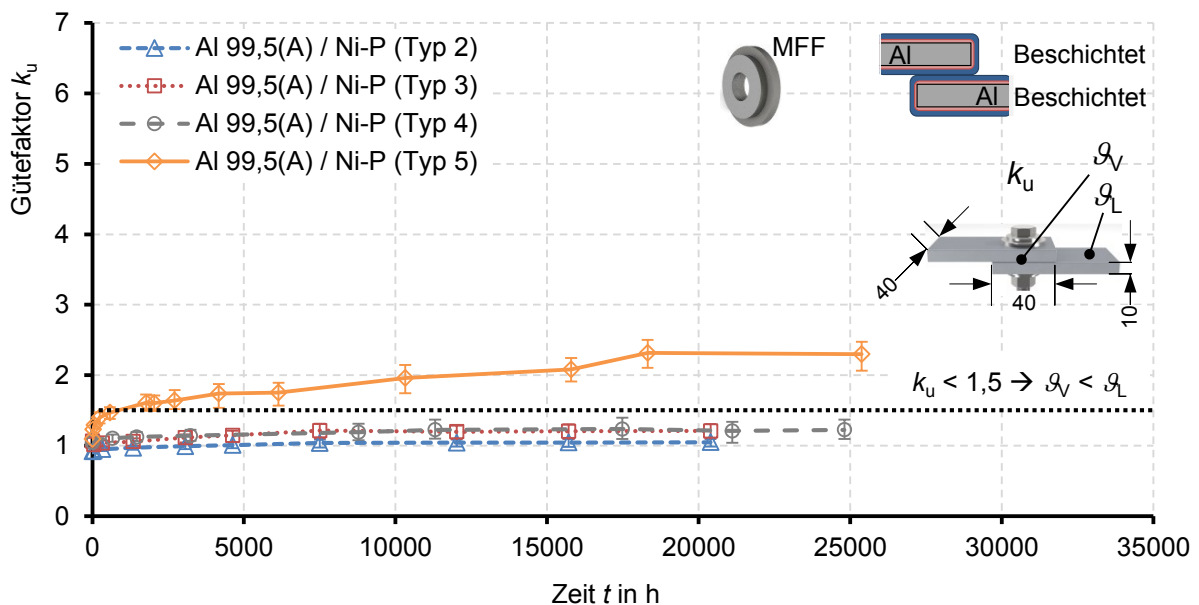


Bild 8.14: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen ((MFF) – Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Al 99,5(A) und einem metallischen Überzug aus Ni-P unterschiedlichen Typs bei 115 °C im Wärmeschränk gelagert

Die geringsten Gütefaktoren wurden an Verbindungen mit vernickelten Stromschienen des Ni-P (Typ 2) und die höchsten Werte für das Ni-P (Typ 5) ermittelt. Der metallische Überzug aus Ni-P (Typ 2) hat die höchste elektrische Leitfähigkeit, aber auch die höchste Härte im nicht wärmebehandelten Neuzustand (Tabelle 2.8). Im Gegensatz dazu ist die elektrische

Leitfähigkeit und Härte des metallischen Überzugs Ni-P (Typ 5) am geringsten. Für ein gutes elektrisches Kontaktverhalten der Schraubenverbindung mit kleinen Anfangsgütefaktoren  $k_{u0}$  nach der Montage ist in diesem Fall scheinbar die elektrische Leitfähigkeit dominant gegenüber der plastischen Verformbarkeit der Mikrospitzen auf der Kontaktfläche.

Nach wenigen Stunden im Wärmeschrank haben sich die Gütefaktoren bei allen Verbindungen erhöht. Insbesondere bei Verbindungen mit vernickelten Stromschienen und metallischem Überzug aus Ni-P (Typ 5) wurden Gütefaktoren von  $k_u > 1,5$  bei einer Betriebstemperatur von 140 °C nach kurzer Zeit bestimmt (Bild 8.15).

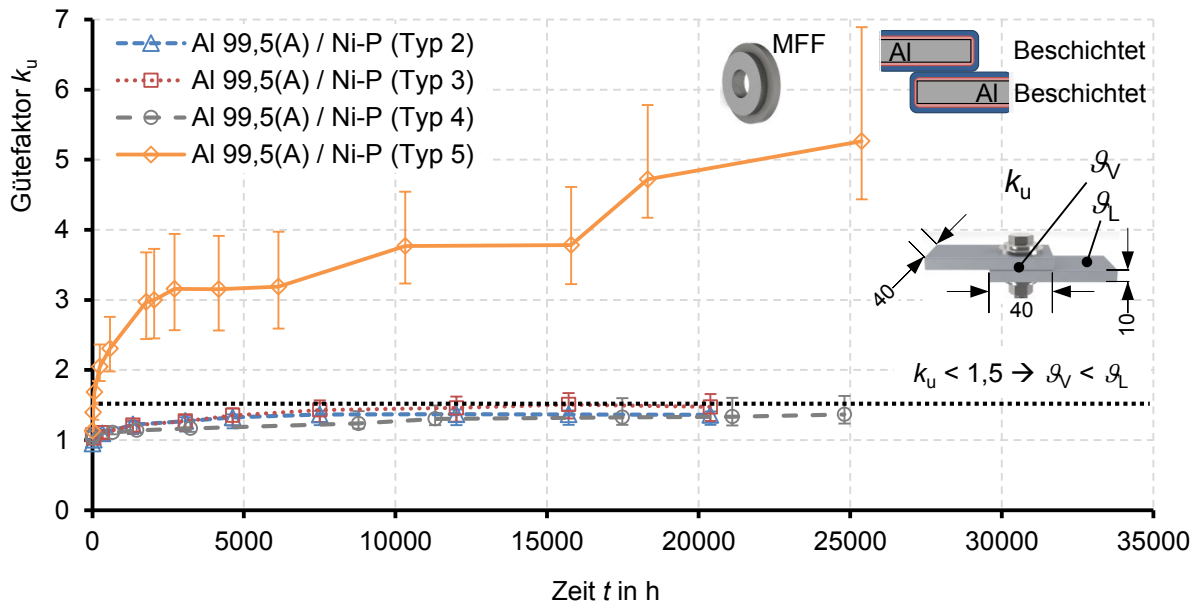


Bild 8.15: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen ((MFF) – Kapitel 6.2.2) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) und einem metallischen Überzug aus Ni-P unterschiedlichen Typs bei 140 °C im Wärmeschrank gelagert

Diese Verbindungen würden bei der Belastung mit dem Bemessungsstrom eine höhere Temperatur im Vergleich zum angeschlossenen Leiter haben und damit beschleunigt altern (Kapitel 3.2). Damit sind die Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen aus Al 99,5(A) und metallischen Überzügen aus Ni-P (Typ 5) nicht langzeitstabil. Schraubenverbindungen mit Stromschienen und metallischem Überzug aus Ni-P der Typen (2 bis 4) zeigen ein langzeitstabiles Verhalten. Bei einer Temperatur von 140 °C wurden geringfügig höhere Gütefaktoren als für eine Temperatur von 115 °C für die Verbindungen mit diesen metallischen Überzügen ermittelt. Diese können aber aufgrund des geringen Anstiegs im Verlauf der Gütefaktoren als unkritisch bewertet werden.

### 8.6.2 Einfluss der Art der thermischen Alterungsprüfung – Dauerlast / Wechsellast

Um das Altern von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen durch thermische Belastungszyklen (TLZ) untersuchen zu können, wurden Schraubenverbindungen für das kontinuierliche Messen des Verbindungswiderstands  $R_v$  während der Belastung präpariert. Es wurde je eine Schraubenverbindung zum Untersuchen der elektrolytisch abgeschiedenen Nickelschicht Ni und des autokatalytisch abgeschiedenen Ni-P (Typ 5) präpariert. Die metallischen Überzüge der Stromschienen aus Al MgSi hatten je



eine Nennschichtdicke von 2,5  $\mu\text{m}$ . Die Verbindungen wurden zunächst bei einer konstanten Temperatur von 140 °C und anschließend zyklisch im Wärmeschrank bei 140 °C und bei Raumtemperatur (RT) von etwa 25 °C gelagert. Damit wurden der Dauerlastbetrieb (DL) und eine Belastung mit Temperaturlastzyklen (TLZ) untersucht. Die Verbindungswiderstände beider Schraubenverbindungen wurden während der Lagerung im Wärmeschrank mit dem Mikroohmmeter nach der Vier-Leiter-Messmethode zyklisch gemessen. Dazu wurden temperaturbeständige und elektrisch isolierte Leitungen zur Einspeisung des Messstroms, sowie als Potentialabgriffe an jeder Verbindung angebracht und aus dem Wärmeschrank herausgeführt (Bild 8.16).

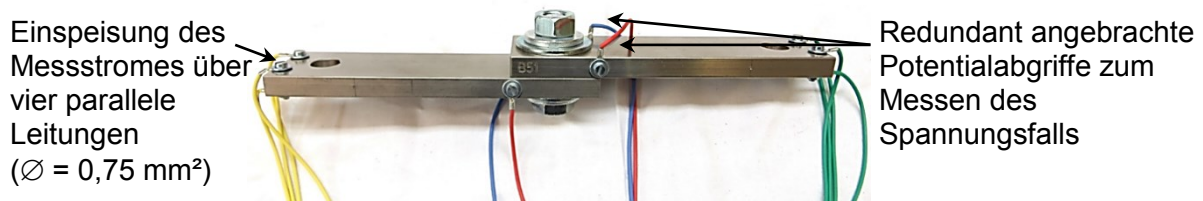


Bild 8.16: Schraubenverbindung mit Stromschienen präpariert für das kontinuierliche Messen des Verbindungswiderstands während des Lagerns im Wärmeschrank

Die gemessenen Verbindungswiderstandswerte wurden auf eine Temperatur von 20 °C bezogen und daraus der Gütefaktor  $k_u$  ermittelt. Im Vergleich zu den Gütefaktoren der stromdurchflossenen und im Wärmeschrank gelagerten Verbindungen in den Langzeitversuchen (Bild 8.3) waren die Gütefaktoren beider Verbindungen mit  $k_u \leq 0,9$  konstant für eine Zeit von  $t = 8.000 \text{ h}$  bei einer Temperatur von 140 °C im Dauerlastbetrieb (DL) (Bild 8.17, Bild 8.18). Nach der konstanten thermischen Belastung wurden die Verbindungen auf Raumtemperatur (RT) abgekühlt. Bereits bei diesem Abkühlvorgang erhöhten sich die Gütefaktoren  $k_u$  um einen Wert von 0,05. Daran anschließend wurden beide Verbindungen Temperaturlastzyklen (TLZ) ausgesetzt. Nach 15 durchgeführten TLZ erhöhte sich der Gütefaktor auf  $k_u = 1,22$  für die Schraubenverbindung mit elektrolytisch vernickelten Stromschienen (Ni) und auf  $k_u = 1,46$  für autokatalytisch beschichtete Stromschienen (Ni-P (Typ 5)). Diese Gütefaktoren von  $k_u < 1,5$  sind damit noch als gut zu bewerten (Kapitel 3.2). Verglichen mit den Gütefaktoren von Verbindungen in den Langzeitversuchen sind diese Werte geringer. Trotzdem wurde durch diese experimentellen Untersuchungen für einen sehr kleinen Stichprobenumfang gezeigt, dass thermische Lastwechsel zu einem Erhöhen des Gütefaktors führen und nicht die Lagerung bei konstanter Temperatur. Es wird vermutet, dass thermische Ausdehnungen der Leiterwerkstoffe, der metallischen Überzüge und der Fügeelemente einen Einfluss haben können. Thermische Dehnungen zwischen den Fügeelementen und den verspannten Stromschienen können in Normalrichtung senkrecht auf der scheinbaren Kontaktfläche, sowie in Tangentialrichtung scherend wirken und die Stabilität der Mikrokontakte beeinflussen. In Normalrichtung zu  $A_s$  wird in der Literatur der „thermoelastic ratcheting effect“ beschrieben [3], [34].

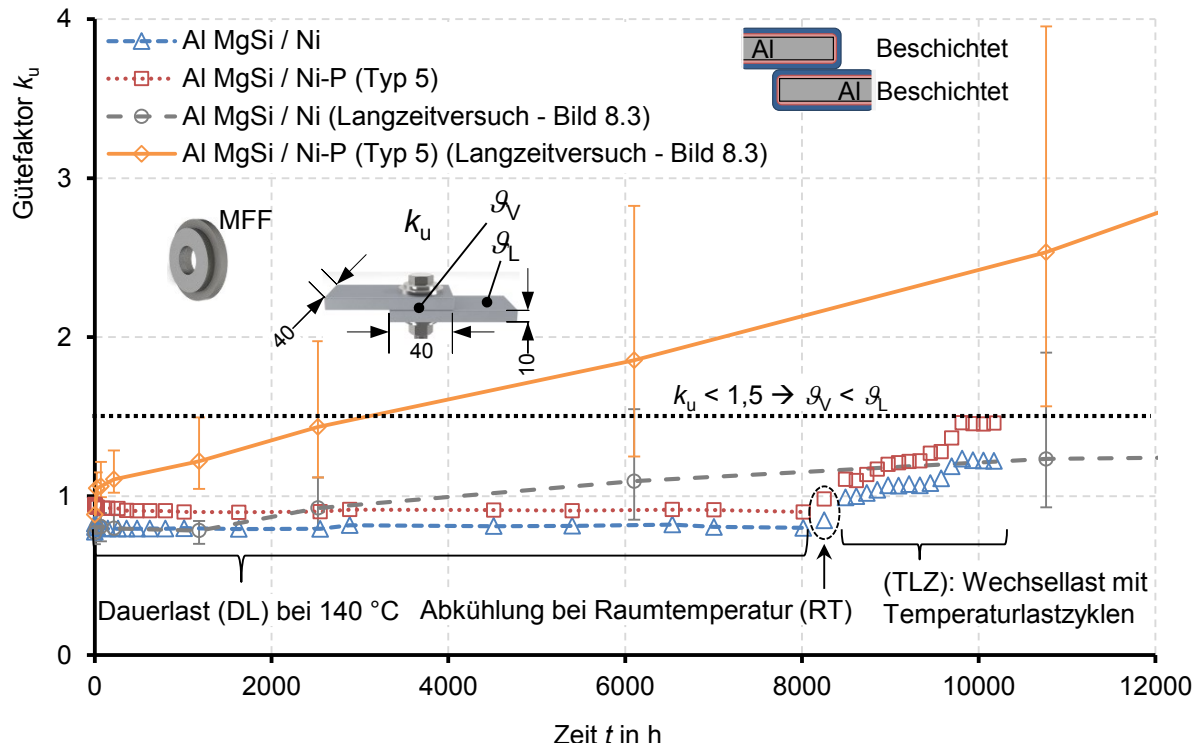


Bild 8.17: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Al MgSi und metallischem Überzug aus elektrolytisch Ni und autokatalytisch Ni-P (Typ 5). Alterung im Dauerlast- (DL) und Wechsellastbetrieb mit (TLZ) bei 140 °C im Wärmeschrank. Vergleich mit den Langzeitversuchen in Bild 8.3.

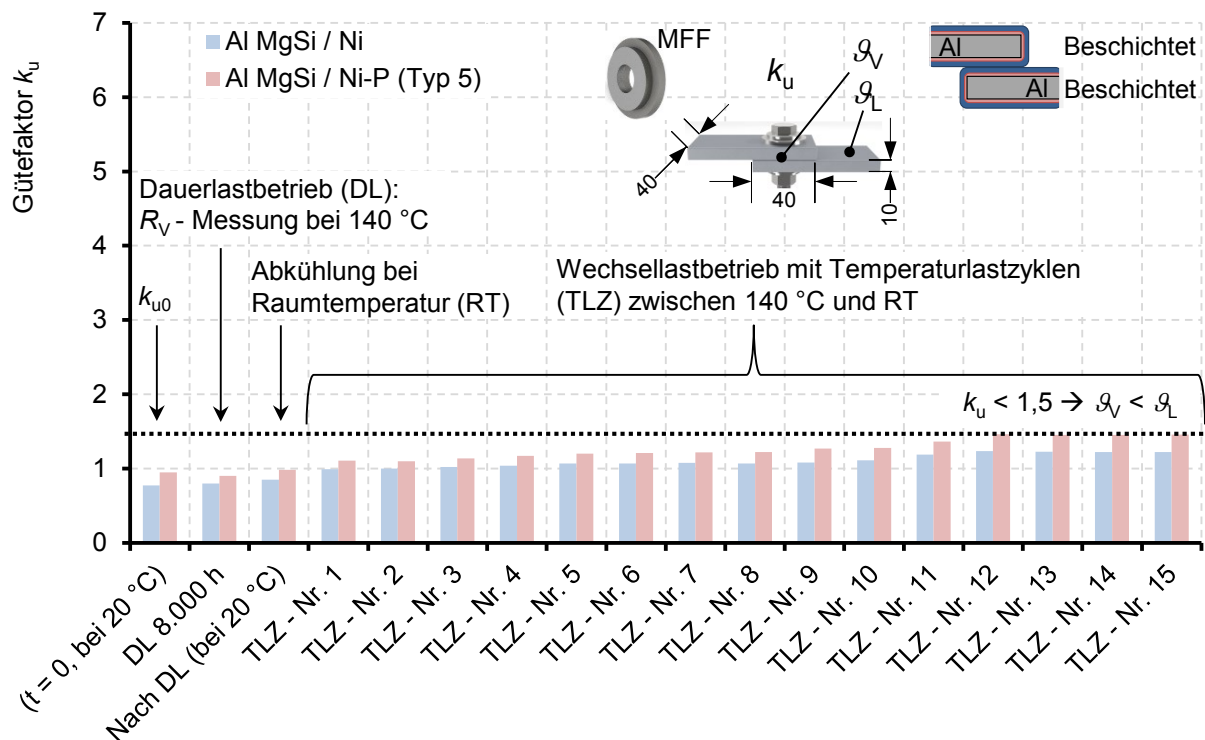


Bild 8.18: Gütefaktor  $k_u$  von Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Al MgSi und metallischem Überzug aus elektrolytisch Ni und autokatalytisch Ni-P (Typ 5). Alterung im Dauerlastbetrieb (DL) bei 140 °C im Wärmeschrank und anschließender Temperaturlastzyklen (TLZ)

Bei diesem Effekt wird die zyklische plastische Verformung der Mikrokontakte durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Aluminium in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen beschrieben. Beim Erwärmen dehnt sich das Aluminium stärker als das Kupfer in Normalrichtung zu  $A_s$ . Durch die höhere Kontaktkraft im erwärmten Zustand, im Vergleich zum Zustand bei Raumtemperatur, werden die Mikrokontakte stärker plastisch verformt. Beim Abkühlen nach der Erwärmung kann durch den zusätzlichen Dehnungsanteil (Kapitel 4.2), die Kontaktkraft kleiner als die Mindestkontaktkraft sein und sich dadurch der Verbindungswiderstand erhöhen. Dieser beschriebene Einfluss durch eine thermische Dehnung wird auch für Pressverbindungen erwähnt. Dehnt sich ein erwärmter Leiter radial in einer mechanisch festeren Hülse, mit geringerer thermischer Dehnung, so verformt sich der Leiter plastisch. Beim Abkühlen können Mikrokontakte zwischen Leiter und Hülse brechen, wenn sie sich nicht wieder elastisch in die Ausgangslage zurückformen können. In Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium wurde ebenfalls ein zusätzliches Verspannen auf eine höhere Kontaktkraft, in Bezug zur Montage, durch thermische Dehnung festgestellt [35]. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Al MgSi  $\alpha_{\text{Al MgSi}} = 23,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ist höher als der von Stahl  $\alpha_{\text{St}} = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , sodass sich die Kontaktkraft im erwärmten Zustand erhöht.

In Tangentialrichtung zur scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  können Mikrokontakte durch mechanische Scherspannungen getrennt werden und sich dadurch der Verbindungswiderstand insbesondere bei Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Aluminium und metallischen Überzug aus Nickel erhöhen (Kapitel 4.3), [77]. Bisher wurde diese Wirkung aber nur bei Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen besonders bei einem metallischen Überzug aus dem amorphen, autokatalytisch abgeschiedenen Ni-P (Typ 5) beobachtet.

## 8.7 Zusammenfassung

An stromführenden Schraubenverbindungen mit zwei beschichteten Stromschienen wird in internationalen Normen [N1], [N5] dieselbe Grenztemperatur von 115 °C dauerhaft zugelassen, wenn die Stromschienen vernickelt oder versilbert sind.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) und zwei versilberten Stromschienen aus Aluminium die geringsten Anfangsgütefaktoren  $k_{u0}$  haben. Die Gütefaktoren änderten sich für eine Zeit von  $t = 25.000 \text{ h}$  bei einer Temperatur von bis zu 140 °C nicht. Das Vorbehandeln mit Ethanol vor dem Fügen der versilberten Stromschienen zu Schraubenverbindungen ist ausreichend. Es wurde für die Verbindungen mit versilberten Stromschienen ein sehr gutes elektrisches Kontakt- und Langzeitverhalten unabhängig von der untersuchten Schichtdicke des metallischen Überzugs und der Zwischenschichten aus elektrolytisch abgeschiedenem Cu oder dem autokatalytisch abgeschiedenen Ni-P (Typ 5) bestimmt. Das Wachsen von vermutlich drei intermetallischen Phasen (IMP) an dem stoffschlüssigen Bereich zwischen dem Leiter aus Aluminium und der Zwischenschicht aus Kupfer hatte keine Auswirkungen auf das elektrische Kontaktverhalten.

Bei Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium sind die Kontaktflächen vor dem Fügen abrasiv, mit z. B. einem Schleifvlies, vorzubehandeln, um

die elektrisch isolierende Nickel-Oxidschicht (NiO) zu entfernen [54]. Die experimentellen Untersuchungen bei einer Temperatur von (115 und 140) °C haben ein langzeitstabileres Verhalten für Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium und metallischen Überzügen aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni sowie den autokatalytisch abgeschiedenen Ni-P der Typen (2 ... 4) gegenüber dem Ni-P (Typ 5) gezeigt. Bei einer Temperatur von 140 °C wurden nach einer Zeit von bis zu  $t = 25.000$  h höhere mittlere Gütefaktoren von  $k_u \approx 1,5$  für Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen ermittelt, als bei einer Temperatur von 115 °C ermittelt. Aufgrund des geringen Anstiegs und der geringen Spannweite können die Gütefaktoren als unkritisch bewertet werden.

Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium und einem metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) mit einer amorphen Mikrostruktur sind nicht langzeitstabil und führen bereits nach kurzer Zeit bei einer Temperatur von 115 °C zu Gütefaktoren  $k_u > 1,5$ . Ein Ausfall der stromführenden Verbindungen ist ab einem Wert von  $k_{u,Grenz} \geq 7$  zu erwarten. Um den dominierenden Alterungsmechanismus für diese Verbindungen zu untersuchen, wurden weitere experimentelle Versuche durchgeführt. Damit konnten die Alterungsmechanismen Kraftabbau, Elektromigration und Interdiffusion ausgeschlossen werden. In mikroskopischen Untersuchungen konnten weder in den Kontaktpunkten zwischen zwei vernickelten Stromschienen mit gerillter Kontaktfläche, noch im stoffschlüssigen Bereich zwischen dem Aluminiumleiter und dem metallischen Überzug aus Nickel IMP bestimmt werden. Weiterhin wurde experimentell für einen metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) nachgewiesen, dass eine strukturelle Umwandlung der amorphen in eine kristalline Struktur zu einer höheren elektrischen Leitfähigkeit führt und sich damit die Gütefaktoren der Schraubenverbindungen in den Langzeitversuchen verringern müssten. Es wird vermutet, dass die höheren Gütefaktoren von Schraubenverbindungen (MFF) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Aluminium und insbesondere für den metallischen Überzug aus Ni-P (Typ 5) auf Versatzbewegungen in der Trennfuge zwischen den Stromschienen durch thermische Dehnung der Werkstoffe zurückzuführen ist. Bei Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen bilden sich überwiegend elastisch verformte Mikrokontakte, die durch Scherkräfte in der Trennfuge zwischen den Stromschienen wahrscheinlich schneller aufbrechen als bei einer Schraubenverbindung mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium [77].

In den Langzeitversuchen an Schraubenverbindungen (MFF) mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium wurden insbesondere für einen metallischen Überzug aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni geringe und langzeitstabile Gütefaktoren nach einer Zeit von  $t = 25.000$  h bei einer Temperatur bis zu 140 °C bestimmt.

Im Gegensatz dazu ist eine stromführende Schraubenverbindung (MFF) zwischen einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium unabhängig von der Temperatur nicht langzeitstabil. Diese Verbindungen würden auch bei der geringeren zugelassenen Grenztemperatur von 90 °C in [N5] gegenüber der zugelassenen Grenztemperatur von 115 °C in [N1] zu einem Ausfall führen. Die hohen Verbindungswiderstände nach kurzer Zeit werden auf die Diffusion von Sauerstoff, durch den metallischen Überzug aus

Silber, zurückgeführt. Der Sauerstoff diffundiert durch die Deckschicht des versilberten Kontaktpartners und lagert sich an den Mikrokontakten auf der Oberfläche des unbeschichteten Leiters aus Aluminium an. Dadurch bilden sich elektrisch isolierende Aluminium-Oxidschichten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und führen zu höheren Gütefaktoren. [75]

Bei mikroskopischen Untersuchungen an versilberten Stromschienen aus Aluminium mit einer Zwischenschicht aus Kupfer wurde neben der Bildung von IMP an dem stoffschlüssigen Bereich zwischen dem Aluminiumleiter und der Zwischenschicht aus Kupfer auch die Diffusion von Kupfer durch die Deckschicht aus Silber sichtbar. An der Oberfläche der Deckschicht aus Silber führte dieses Kupfer zu einer schwarzen Anlaufschicht, wahrscheinlich einer Kupfer-Oxidschicht aus  $\text{Cu}_2\text{O}$  [42]. In den Langzeitversuchen an stationären, stromführenden Schraubenverbindungen (MFF) mit versilberten Stromschienen führte diese Anlaufschicht durch den Kraftschluss in der Verbindung nicht zu einem höheren Verbindungswiderstand. Bei quasistationären, stromführenden Steckverbindungen könnte sich durch eine Kupfer-Oxidschicht bei einer Neukontaktierung der Verbindungswiderstand erhöhen.

## 9 Ausblick

In dem numerischen Berechnungsmodell einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 wurde eine Korrelation zwischen der inhomogen verteilten mechanischen Spannung auf der scheinbaren Kontaktfläche  $A_s$  und dem elektrischen Kontaktverhalten hergestellt. Dieses Modell ist für eine Kontaktkraft von  $F_K = 25 \text{ kN}$  für eine Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) und für die spezifische Oberfläche von gebürstetem Aluminium verifiziert und validiert. Durch experimentelle Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem Verbindungswiderstand und der Kontaktkraft ist dieses Modell für Schraubenverbindungen mit beschichteten Stromschienen zu erweitern. Es ist zu überprüfen, ob die Messungen des Verbindungswiderstands von Verbindungen mit Druckelementen aus Stahl und einer mittleren mechanischen Spannung auf der scheinbaren Kontaktfläche ausreichend sind, um über angepasste flächenbezogene Leitwerte  $G'$  den Verbindungswiderstand von Schraubenverbindungen (OFF) mit beschichteten Stromschienen zu berechnen. Weiterhin ist zu untersuchen, ob die experimentell bestimmten Verbindungswiderstände von Schraubenverbindungen mit einer geringeren Anfangskontaktkraft, sowie anderen Stromschienengeometrien und Fügeelementen berechnet werden können.

In den Langzeitversuchen zum Abbau der Kontaktkraft an Schraubenverbindungen mit unbeschichteten Stromschienen wurde der geringste Kraftabbau für den naturharten Werkstoff Al Mg0,5Mn0,5 bestimmt. Für die Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente mit diesem Werkstoff wurde eine höhere Kontaktkraft nach einer Zeit von 25.000 h bei einer Temperatur von  $140^\circ\text{C}$  bestimmt als für Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen und Stromschienen aus Al MgSi(B). Die Langzeitversuche an diesem vielversprechenden Werkstoff sind weiterzuführen und durch weitere Langzeitversuche bei einer höheren Temperatur zu erweitern, um die Grenztemperatur des Werkstoffs in der Schraubenverbindung zu ermitteln.

Für Schraubenverbindungen mit zwei vernickelten Stromschienen insbesondere für einen metallischen Überzug aus autokatytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) ist das Altern durch

einen Wechsellastbetrieb mit Temperaturlastzyklen weiter zu untersuchen. Das Altern von Schraubenverbindungen mit einer versilberten Stromschiene und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium durch die Diffusion von Sauerstoff im Silber und der anschließenden Bildung von Oxidschichten ist durch Versuche in verschiedenen Atmosphären nachzuweisen. Durch mikroskopische Untersuchungen sind dafür Oxidschichten nach einer Wärmebehandlung sichtbar zu machen und ein Zusammenhang zu höheren Werten des Verbindungswiderstands einer Schraubenverbindung mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene herzustellen.

## Literaturverzeichnis

### Bücher, Zeitschriften Veröffentlichungen:

- [1] *Kammer, C.:* Aluminium-Taschenbuch 1 – Grundlagen und Werkstoffe. 16. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, 2002.
- [2] *Hildmann, C.:* Zum elektrischen Kontakt- und Langzeitverhalten von Pressverbindungen mit konventionellen und Hochtemperatur-Leiterseilen mit geringem Durchhang. Dissertation. Dresden: Selbstverlag, 2016. ISBN 978-3-00-056211-2
- [3] *Braunovic, M.; Konchits, V. V.; Myshkin, N. K.:* Electrical contacts: Fundamentals, applications and technology. Fla., London: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-57444-727-9
- [4] *Ostermann, F.:* Anwendungstechnologie Aluminium. 3., neu bearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-662-43806-0
- [5] *Kammer, C.:* Aluminium-Taschenbuch 2 – Umformen von Aluminium Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie. 15. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, 1996. ISBN 3-87017-242-8
- [6] *Altenpohl, D.:* Aluminium und Aluminiumlegierungen. Berlin, Heidelberg: 1965. ISBN 978-3-662-30246-0
- [7] *Schatt, W.; Worch, H.:* Werkstoffwissenschaft. 8. Auflage, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. ISBN 3-342-00675-7
- [8] *Schlegel, S.:* Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Reinkupfer in der Elektroenergietechnik unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur. Dissertation. Dresden: Selbstverlag, 2011.
- [9] *Lücke, N.:* Zum Langzeitverhalten elektrischer Steckverbindungen mit Kupfer-Beryllium-Kontaktlamellen. Dissertation. Dresden: TUDpress, 2014.
- [10] *Schröder, K.-H.:* Werkstoffe für elektrische Kontakte und ihre Anwendungen. 2. Auflage: Expert Verlag, 1997. ISBN 3-8169-146-2
- [11] *Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.:* Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13794-6
- [12] *Reiso, O.:* Extrusion of AlMgSi Alloys. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, 2004.
- [13] *Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Kemsies R. H.; Milkereit, B.; Kessler, O.; Lentz, M. C.; Aegerter, J.:* Entwickeln, Erforschen und Qualifizieren neuer Aluminiumlegierungen für stromführende Verbindungen. VDE-Fachbericht 73, VDE-Verlag. Tagungsband zum 24. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2017.

- 
- [14] Kemsies, R. H.; Milkereit, B.; Kessler, O.; Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Plonus, F.; Miller-Jupp, S. P.; Hirsch, J.: Effect of Dispersoids on long-term stable electrical connections. Material Science Forum, 2016.
- [15] Kemsies, R. H.; Milkereit, B.; Wenner, S.; Holmestad, R.; Kessler, O.: In situ DSC investigation into the kinetics and microstructure of dispersoid formation in Al-Mn-Fe-Si(-Mg) alloys. In Materials and Design, vol. 146, pages 96 - 107: Elsevier Ltd., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.007>
- [16] Bauser, M.; Sauer, G.; Siegert, K.: Strangpressen. Aluminium Fachbuchreihe, 2. Auflage, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2001. ISBN 3-87017-249-5
- [17] Milkereit, B.: Kontinuierliche Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramme von Al-Mg-Si-Legierungen. Dissertation, Universität Rostock, 2011.
- [18] Vinaricky, E. (Hg.): Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-642-45426-4
- [19] Deutsches Kupferinstitut: Kupfer. 2. Auflage. Berlin: Saladruck, 1961. ISBN 3-921505-01-1
- [20] Kanani, N.: Chemische Vernicklung – Nickel-Phosphor-Schichten, Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen. 1. Aufl. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2007. ISBN 978-3-87480-229-1
- [21] Schmitt, W.; Kißling, S.; Behrens, V.: Elektrochemisch hergestellte Schichtsysteme auf Aluminium für Kontaktanwendungen. VDE-Fachbericht 67, VDE-Verlag, Tagungsband zum 21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011.
- [22] Jelinek, T. W.: Praktische Galvanotechnik – Lehr und Handbuch. Bad Saulgau Eugen G. Leuze Verlag, 2005. ISBN 3-87480-207-8.
- [23] Hagen, B.; Kufner, T.; Freudiger, G.: Grundlegende Untersuchungen an tribologischen Systemen zur optimierten Auslegung von Steckverbindern in der Elektroenergietechnik. VDE-Fachbericht 73, VDE-Verlag. Tagungsband zum 24. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2017.
- [24] Technisches Merkblatt O6: Beizen und Entfetten von Aluminium. 7. Auflage: Aluminium-Zentrale e.V., 1992. [http://www.aluinfo.de/files/\\_media/dokumente/Downloads/Technische%20Daten/Merkblaetter/O6\\_Beizen\\_und\\_Entfetten\\_von\\_Aluminium.pdf](http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Technische%20Daten/Merkblaetter/O6_Beizen_und_Entfetten_von_Aluminium.pdf) (06.12.2018)
- [25] Technisches Merkblatt O8: Galvanische und chemische Überzüge. 2. Auflage: Aluminium-Zentrale e.V., 2000. [http://www.aluinfo.de/files/\\_media/dokumente/Downloads/Technische%20Daten/Merkblaetter/O8\\_Galvanische\\_und\\_chemische\\_Ueberzuege.pdf](http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Technische%20Daten/Merkblaetter/O8_Galvanische_und_chemische_Ueberzuege.pdf) (06.12.2018)
- [26] Bach, F.-W.; Möhwald, K.; Laarmann, A.; Wenz, T.: Moderne Beschichtungsverfahren. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [27] Stallmann, K.: Außenstromlos abgeschiedene Nickelschichten. Herstellung, Struktur, Eigenschaften. Dissertation. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt, 1983.



- 
- [28] *Keil, A.; Merl, W. A.; Vinaricky, E.*: Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe – Grundlagen, Werkstoffeigenschaften, Technologien, Anwendungen in der elektrischen Nachrichten- und Energietechnik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-12233-8
  - [29] *Müller, F.*: Herstellung, Mikrostruktur und Eigenschaften von außenstromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schichten mit nanokristallinen Aufbau. Reihe 5: Grund- und Werkstoffe Nr. 427, Düsseldorf, Hamburg: VDI Verlag, 1996
  - [30] *Bielinsky, J. et al.*: Außenstromlos abgeschiedene Nickel-Korund-Dispersionsschichten, in: Berichtsband über den 3. EAST-Kongress, Schwäbisch Gmünd, 18.-19. November 1993. (siehe auch Galvanotechnik 86, 1995, Nr. 1, S. 81-86)
  - [31] *Holm, R.*: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1941. ISBN 978-3-662-42222-9
  - [32] *Böhme, H.*: Mittelspannungstechnik: Schaltanlagen berechnen und entwerfen. 2. stark bearbeitete Auflage. Berlin: Huss-Medien, Verlag Technik, 2005. ISBN 3-341-014950
  - [33] *Holm, R.*: Electrical contacts: Theory and Application. 4<sup>th</sup> edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. ISBN 3-540-03875-2
  - [34] *Slade, P. G.*: Electrical contacts: Principles and Application. 2<sup>nd</sup> edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4398-8131-6
  - [35] *Schoft, S.*: Langzeitverhalten elektrotechnischer Verbindungen unter Berücksichtigung des Kriechens der Leitermaterialien. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 381, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2008.
  - [36] *Bergmann, R.*: Zum Langzeitverhalten des Widerstandes elektrischer Stromschienenverbindungen. Dissertation. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996.
  - [37] *Schneider, R.*: Langzeitverhalten geschraubter Stromschienenverbindungen in der Elektroenergietechnik. Dissertation. Dresden: TU Dresden, 2012.
  - [38] *Pfeifer, S.*: Einfluss intermetallischer Phasen der Systeme Al-Cu und Al-Ag auf den Widerstand stromführender Verbindungen im Temperaturbereich von 90 °C bis 200 °C. Dissertation. Dresden: Selbstverlag, 2015.
  - [39] *Löbl, H.*: Zur Dauerstrombelastbarkeit und Lebensdauer der Geräte der Elektroenergieübertragung. Dissertation B, TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, 1984.
  - [40] *Jochim, M.*: Langzeitverhalten nicht lösbarer, beschichteter Verbindungen in der Elektroenergietechnik. Dissertation. TU Dresden, Fortschritt-Berichte VDI, Nr. 567, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2007.
  - [41] *Blumenroth, F.*: Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Schraubenfedern in Anlagen der Elektroenergietechnik. Aachen: Shaker, 2010. ISBN 978-3-8322-9506-6

- 
- [42] *Gatzsche, M.*: Elektrisch-thermisches Betriebs- und Langzeitverhalten hochstromtragfähiger Kontaktelemente. Dissertation, TU Dresden, Aachen: Shaker Verlag, 2016. ISBN 978-3-8440-4894-0
- [43] *Dreier, S.*: The Impact of Films on the Long-Term Behavior of Stationary Electrical Connections and Contacts in Electric Power Systems. Dissertation, TU Dresden, 2016.
- [44] *Großmann, S.*: Zur Gestaltung und zum Betriebsverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik. Dissertation, TU Dresden, 1988.
- [45] *Höft, H.*: Elektrische Kontakte. Physikalische Grundlagen. Berlin: VEB Verlag Technik, 1977.
- [46] *Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.*: Studies on current-carrying connections with flat surfaces – relationship between mechanical stress and electrical contact behaviour. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, Edinburgh, 2016.
- [47] Gmelin-Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. 61: Silber, Teil B1: Verbindungen mit Edelgasen, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Fluor und Chlor, 8. Auflage Weinheim: Verlag Chemie 1971.
- [48] *Großmann, S.; Löbl, H.; Schlegel, S.*: Erfahrungen zum Langzeitverhalten von Aluminium – Verbindungen in Starkstromanlagen. VDE-Fachbericht 67, VDE-Verlag, Tagungsband zum 21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011.
- [49] Gmelin-Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. 35: Aluminium, Teil B: Die Verbindungen des Aluminiums. 8. Auflage, Berlin: Verlag Chemie 1934.
- [50] Gmelin-Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. 60: Kupfer, Teil B-Lieferung 1: Verbindungen bis Kupfertellurate. 8. Auflage, Weinheim: Verlag Chemie 1958.
- [51] Gmelin-Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. 60: Kupfer, Teil D: Elektrische Eigenschaften der Kupferoxide. 8. Auflage, Weinheim: Verlag Chemie 1963.
- [52] *Samsonov, G. V.*: The Oxide Handbook. 2. Auflage, New York: IFI/Plenum, 1982. ISBN 0-306-65177-7
- [53] *Landolt – Börnstein – Group III: Condensed Matter. vol. 41c: Non-Tetrahedrally Bonded Elements and Binary Compounds I, silver sulfide (Ag<sub>2</sub>S) crystal structure.* 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
- [54] *Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.*: Comparison between nickel and silver as coating materials of conductors made of copper or aluminum used in electric power engineering. Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts (ICEC), 2014, Dresden.
- [55] *Wiegand, H.; Kloos, K.-H.; Thomala, W.*: Schraubenverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung. 5. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-21282-9.
- [56] *Bürgel, R.*: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik. Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag 2006. ISBN 978-3-528-23107-1

- 
- [57] *Ashby, M. F.; Jones, D. R. H.: Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen und Anwendungen. Heinzelmann, M. (Hg.): Aus dem Englischen übersetzt und Deutsch herausgegeben. 3. Auflage, München: Spektrum Akademischer Verlag, 2006. ISBN-13: 978-3-8274-1708-4*
- [58] *Ashby M. F.; Jones, D. R. H.: Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe. Heinzelmann, M. (Hg.): Aus dem Englischen übersetzt und Deutsch herausgegeben. 3. Auflage, München: Spektrum Akademischer Verlag, 2007. ISBN-13: 978-3-8274-1709-1*
- [59] *Weertmann, J.: Theory of Steady-State Creep Based on Dislocation Climb, J. Appl. Phys. 26, 1955, 1213-1217*
- [60] *Courtney, T. H.: Mechanical Behaviour of Materials. McGraw-Hill, New York, 1990.*
- [61] *Monkman, F. C.; Grant, N. J.: An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep Rupture Tests. Proc. ASTM 1956, Vol. 56, pp. 593-605*
- [62] *Larson, F.; Miller, J.: A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses. Trans. ASME 1952, Vol. 74, pp. 765-775*
- [63] *Jelinek, T. W.: Oberflächenbehandlung von Aluminium. Saulgau / Württ: Eugen G. Leuze Verlag, 1997.*
- [64] *Dettner, H. W.; Elze, J.; Raub, E.: Handbuch der Galvanotechnik – Grundlagen, Einrichtungen, Vorbehandlungen. Band 1, Teil 2. München: Carl Hanser Verlag, 1964.*
- [65] *Massalski, T. B.: Binary Alloy Phase Diagrams. Band 1 bis 3, ASM-International, Metals Park Ohio, 1996. ISBN 0-87170-403*
- [66] *D'Heurle, F.; Alliota, C.; Angilello, J.; Brusica, V.; Dempsey, J.; Irmischer, D.: The deposition by evaporation of Cu-Al Alloy films. Vacuum 27, No. 4, Pergamon Press, Great Britain, 1977.*
- [67] *Braunovic, M.; Alexandrov, N.: Intermetallic compounds at aluminium-to-copper and copper-to-tin electrical interfaces. 38<sup>th</sup> Holm Conference on Electrical Contacts, Philadelphia, 1992. ISBN 0-7803-0576-0*
- [68] *Pfeifer, S.; Willing, H.; Kappl, H.: Verbesserung der Zuverlässigkeit elektrischer Bimetallverbindungen aus Aluminium-Kupfer und Aluminium-Silber für die Energieübertragung im Temperaturbereich 90-200 °C. Abschlussbericht Aif-Projekt 16903BG, 2013.*
- [69] *Jacobi H.; Vassos, B.; Engell, H.-J.: Electrical properties of  $\beta$ -phase NiAl. J. Phys. Chem. Solids, Pergamon Press Vol. 30, pp. 1261-1271. Max-Planck-Institut für Metallforschung, Institut für Metallkunde. Stuttgart, 1969.*
- [70] *Terada Y.; Ohkubo, K.; Mohri T.; Suzuki, T.: Thermal Conductivity of Intermetallic Compounds with Metallic Bonding. Materials Transactions, Vol. 43, No. 12, pp.3167 to 3176. The Japan Institute of Metals, 2002.*
- [71] *Dey, G. K.: Physical metallurgy of nickel aluminides. Sadhana Vol. 28, Parts 1 & 2, pp. 247 to 262. Materials Science Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai, 2003.*

- 
- [72] *Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Hoidis, M.:* Investigations on stationary electrical joints with a bare and a silver or nickel coated contact partner regarding the permissible temperature limit according to ANSI IEEE and IEC. Proceedings of the 60<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, 2014.
- [73] *Pfeifer, S.; Willing, H.; Oberst, M.:* Auswirkung von Oxiden innerhalb galvanischer Beschichtungen auf die Zuverlässigkeit und das Langzeitverhalten elektrischer Verbindungen der Energietechnik. Abschlussbericht AiF-Projekt 17860BG, 2017.
- [74] *Pfeifer, S.; Großmann, S.; Willing, S.:* Characterization of Intermetallic Compounds in Al-Ag Bimetallic Interfaces. Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014
- [75] *Oberst, M.; Schlegel, S.; Großmann, S.:* Influence of oxygen on the aging of electrical joints with one bare and one coated aluminum contact member. Proceedings of the 64<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts together with 29<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, 2018.
- [76] *Talgner F.; Myers, M.; Schmidt, H.:* Galvanisch Silber-Palladium als Kontaktoberfläche. Tagungsband zum 23. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015.
- [77] *Bond, N. T.; McGeary, F. L.:* Nickel Plating for Improved Electrical Contact to Aluminum. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. IA-9, No. 3, May/June, 1973.
- [78] *Yastrebov, V. A.; Cailletaud, G.; Proudhorn, H.; Mballa, F. S., Noel, S.; Testé, P.; Houzé, F.:* Three-Level Multi-scale Modeling of Electrical Contacts – sensitivity study and experimental validation. Proceedings of the 61<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, 2015.
- [79] *Fuhrmann, T.; Schlegel, S.; Großmann, S.:* Langzeitverhalten von optimierten Verbindungssystemen mit Leitern aus Al und Al-Legierungen bei Temperaturen über 90 °C. VDE-Fachbericht 69, VDE-Verlag. Tagungsband zum 22. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2013.
- [80] *Schlegel S.; Großmann, S.; Lakner, M.; Schoenemann, T.:* Investigations on material structural changes on electrical joints at high contact temperature. Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, pp.7-11, 2012, ISBN 97816227631
- [81] *Harmsen, U.; Saeger, K. E.:* Über das Entfestigungsverhalten von Silber verschiedener Reinheiten. Metall Fachzeitschrift für Metallurgie, Ausgabe 7, Band 8, Seiten 683 – 686, 1974.
- [82] *Davis, J. R.:* Copper and Copper Alloys. ASM International. 2001. ISBN 0-87170-726-8
- [83] *Ronnquist, A.; Fischmeister, H.:* The oxidation of copper – a review of published data. Journal of the Institute of Metals, Band 89, 1960, Nr.2, S. 65 - 76

Normen:

- [N1] IEC 62271-1:2007: High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications. – DIN EN 62271-1:2009-08: Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen – Teil 1: Gemeinsame Bestimmungen
- [N2] DIN 40501-2:2005-03: Aluminium für die Elektrotechnik - Teil 2: Rohre, Stangen und Profile, Technische Lieferbedingungen
- [N3] IEC 61439-1:2011: Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1: General Rules. DIN EN 61439-1:2012-06: Niederspannungs-Schaltgeräte-kombinationen – Teil 1: Allgemeine Festlegungen
- [N4] DIN EN 573-3:2013-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen
- [N5] ANSI IEEE Std. C37.100.1<sup>TM</sup>:2007-05: IEEE Standard of Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V
- [N6] IEC 60947-1:2007 + A1:2010 + A2:2014: Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules. DIN EN 60947-1:2015-09: Niederspannungsschaltgeräte – Teil 1: Allgemeine Festlegungen
- [N7] DIN EN 573-2:1994-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 2: Bezeichnungssystem mit chemischen Symbolen
- [N8] DIN EN 755-2:2013-03: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 2: Mechanische Eigenschaften
- [N9] DIN EN 515:1993-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Halbzeug: Bezeichnungen der Werkstoffzustände
- [N10] DIN 1712-3:1976-12: Aluminium; Halbzeug (ersetzt durch DIN EN 573-3:2009-08)
- [N11] DIN EN ISO 1456-2009-12: Metallische und andere anorganische Überzüge – Galvanische Überzüge aus Nickel, Nickel plus Chrom, Kupfer plus Nickel und Kupfer plus Nickel plus Chrom
- [N12] DIN EN ISO 4527:2003-10: Metallische Überzüge – Autokatalytisch (außenstromlos) abgeschiedene Nickel-Phosphor-Legierungs-Überzüge – Spezifikationen und Prüfverfahren
- [N13] ASTM International B700 – 08: Standard Specification for electrodeposited Coatings of Silver for Engineering Use
- [N14] VDI 2230 Blatt 1:2015-11: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindungen
- [N15] DIN EN ISO 6892-1:2016-06: Metallische Werkstoffe-Zugversuch – Teil 1, Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- [N16] DIN 50125:2016-12: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben
- [N17] IEEE Std. 1283<sup>TM</sup>-2004: IEEE Guide for Determining the Effects of High-Temperature Operation on Conductors, Connectors and Accessories

- [N18] DIN EN ISO 204:2017-06 - Entwurf Metallische Werkstoffe - Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung - Prüfverfahren (ISO/DIS 204:2017); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 204:2017
- [N19] DIN EN ISO 4526:2004-12: Metallische Überzüge – Galvanische Nickelüberzüge für technische Zwecke
- [N20] DIN EN ISO 4521:2009-01: Metallische Überzüge und andere anorganische Überzüge – Galvanische Silber- und Silberlegierungs-Überzüge für technische Zwecke – Anforderungen und Prüfverfahren
- [N21] ASTM B488-11: Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Gold for Engineering Use
- [N22] DIN 933:1983-12: Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf; Gewinde M 1,6 bis M 52, Produktklassen A und B; (Norm zurückgezogen - ISO 4017 modifiziert EN ISO 4017:2015-05: Mechanische Verbindungselemente – Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf - Produktklassen A und B (ISO 4017:2014); Deutsche Fassung EN ISO 4017:2014)
- [N23] DIN 934:1987-10: Sechskantmutter; Metrisches Regel- und Feingewinde; Produktklassen A und B (Norm zurückgezogen – Schlüsselweiten nicht direkt vergleichbar mit DIN EN ISO 4032:2013-04: Sechskantmutter (Typ 1) - Produktklassen A und B (ISO 4032:2012); Deutsche Fassung EN ISO 4032:2012)
- [N24] DIN EN ISO 7089:2000-11: Flache Scheiben - Normale Reihe, Produktklasse A (ISO 7089:2000); Deutsche Fassung EN ISO 7089:2000
- [N25] DIN EN ISO 7093-1:2000-11: Flache Scheiben - Große Reihe - Teil 1: Produktklasse A (ISO 7093-1:2000); Deutsche Fassung EN ISO 7093-1:2000
- [N26] DIN 6796:2009-08: Spannscheiben für Schraubenverbindungen
- [N27] DIN 267-26:2005-12: Mechanische Verbindungselemente – Technische Lieferbedingungen – Teil 26: Spannscheiben aus Federstahl für Schraubenverbindungen
- [N28] VDI 2230 Blatt 2:2014-12: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Mehrschraubenverbindungen
- [N29] DIN EN ISO 6507-1:2016-08 (Entwurf): Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren
- [N30] DIN EN ISO 4516:2002-10: Metallische und andere anorganische Überzüge – Mikrohärteprüfungen nach Vickers und Knoop

## Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Mikrostruktur kaltverfestigter, umgeformter Stromschienen aus Aluminium. a) axial gestreckte Körner mit Gitterbaufehlern, b) Stufenversetzung, c) Schraubenversetzung, d) Fremdatom auf dem Platz eines Aluminiumatoms (Substitutionsatom), e) Zwischengitteratom, f) Leerstelle. (Schematisch) nach [1], [8].....	4
Bild 2.2:	Fertigungsverfahren einer Stromschiene vom Guss bis zum Halbzeug [12], [13].....	6
Bild 2.3:	Prinzip des elektrolytischen Abscheidens eines Nickelüberzugs nach [26].....	11
Bild 2.4:	Prinzip des autokatalytischen Abscheidens von Ni-P-Überzügen (nach [20], [30]).....	12
Bild 3.1:	Schemata zum Kontaktieren von Flächenkontakten. a) Modell zum Flächenkontakt, b) schematische Darstellung zur Verteilung und Art der Kontaktflächen, c) experimentelle Versuchsanordnung zu diesem Modell.....	13
Bild 3.2:	Einflussparameter und Modellvorstellungen zu Mikrokontakten in stationären Verbindungen beim Formieren während des Verbindens elektrischer Leiter, der Stabilität im Langzeitbetrieb und des Ausfalls der Kontakte durch Alterung.....	14
Bild 3.3:	Kontaktieren am Beispiel der Schraubenverbindung (schematisch) a) Schraubenverbindung mit Stromschienen, b) Verteilung der Kontaktflächen und der Durchströmung, c) Ersatzschaltbild .....	15
Bild 3.4:	Schemata zum Verhalten des a) Kontaktwiderstands $R_K$ und b) des Verbindungs-widerstands $R_V$ abhängig von der Kontaktkraft $F_K$ und des tatsächlich durchströmten Materialanteils der Stromschienen $R_M$ durch die Kontaktfläche $A_{KF}$ .....	17
Bild 3.5:	Anordnung zum Messen des elektrischen Widerstands der Verbindung $R_V$ und des homogen durchströmten Materials $R_{Mat}$ für die Länge $l_0$ der überlappenden Stromschienen in einer Schraubenverbindung.....	18
Bild 4.1:	Mechanischer Kontakt in der Schraubenverbindung a) Ausbreitung eines Druckkegels und einer elliptischen mechanischen Kontaktfläche mit den Halbachsen $a$ und $b$ . b) innere Trennfugen und Dehnung der Schraube beim Verspannen. (schematisch).....	23
Bild 4.2:	Änderung der Mikrostruktur in einer Stromschiene aus Aluminium a) durch Kaltumformen gestreckte Körner mit hoher Versetzungsdichte, b) erholte Mikrostruktur durch Versatzbewegung, c) rekristallisierte Mikrostruktur mit höherer Anzahl an Körnern (schematisch) nach [8], [56] .....	26
Bild 4.3:	Schema eines Verformungsmechanismen-Diagramms für einen Aluminiumwerkstoff mit einer Schmelztemperatur von technisch reinem Aluminium ( $T_M = 947\text{ °C}$ ) und einer Korngröße von $32\text{ }\mu\text{m}$ nach [11], [60] .....	29

Bild 4.4:	Hierarchie der Prozesse beim Abbau der Kontaktkraft in Schraubenverbindungen mit Stromschienen, a) Stromschienen aus reinem Kupfer (Cu-ETP) [8], b) Stromschienen aus technisch reinem Aluminium basierend auf den dargestellten Verformungsmechanismen in (Bild 4.3) nach [11], [60] .....	30
Bild 4.5:	a) Intermetallische Phasen (IMP) in den Mikrokontakten zwischen einer unbeschichteten und einer versilberten Stromschiene aus Aluminium mit einer Zwischenschicht aus Kupfer, b) Trennen und Neukontaktieren der Mikrokontakte auf einer Al-Oxid-Fremdschicht durch Versatzbewegung (schematisch) nach [38] .....	33
Bild 4.6:	Übersicht der Volumen- und Grenzflächendifusionswege in der Mikrostruktur. a) Oberflächendifusion b) Korngrenzendifusion c) Volumendifusion (schematisch) nach [38] .....	34
Bild 4.7:	Elektrisches Kontaktverhalten im System Al - Ni und Ni - Ni bei axialen Versatzbewegungen durch eine Kraft $F_a$ . a) Mechanisch festere Ni-Mikrospitzen verformen das weiche Aluminium plastisch und fixieren die stromführenden Kontakte. b) Aufbrechen der überwiegend elastisch verformten Ni-Ni-Kontakte bei axialer Kraft. ....	38
Bild 6.1:	Stromschienen für die Langzeitversuche a) Stromschiene mit gerillter, spanabhebend bearbeiteter Kontaktfläche. b) Beispiel einer Stromschiene für die stromführenden Verbindungen im Hochstromkreis (Tabelle 6.3). ....	42
Bild 6.2:	Schraubenverbindungen mit Stromschienen ohne federnde Fügeelemente (OFF). a) Mechanische Spannungsverteilung zwischen den Stromschienen, b) Zusammenhang zwischen der Dehnung der Schraube und der Kontaktkraft (schematisch) .....	43
Bild 6.3:	Schraubenverbindungen mit Stromschienen und federnden Fügeelementen (MFF). a) Mechanische Spannungsverteilung zwischen den Stromschienen, b) Zusammenhang zwischen der Dehnung des Schrauben-Federn-Systems und der Kontaktkraft .....	44
Bild 6.4:	Prinzipielle Vorgehensweise beim Aufbau und dem Durchführen der Versuche .....	45
Bild 6.5:	Langzeitversuch im Hochstromkreis zum Untersuchen stromführender Schraubenverbindungen mit Stromschienen .....	47
Bild 6.6:	Kraftmesseinrichtungen an stromführenden Schraubenverbindungen mit Stromschienen .....	48
Bild 6.7:	Bestimmen der Vorspannkraft von Schraubenverbindungen abhängig vom Anziehdrehmoment $M_A$ in der Materialprüfmaschine .....	49
Bild 7.1:	Numerische Berechnungen an Schraubenverbindungen mit Stromschienen a) Strukturmechanisches Modell, b) Modell zum elektrischen Kontaktverhalten, (schematisch) .....	50
Bild 7.2:	Ablaufschema zum Korrelieren des elektrischen Kontaktverhaltens mit der mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche $A_s$ in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen .....	51



Bild 7.3:	Mechanischer Kontakt in der Schraubenverbindung a) Ausbreitung des Druckkegels und analytischer Ansatz zum Berechnen der Ersatzquerschnitts-fläche $A_{ers}$ , b) Geometrische Größen für die Berechnung von $A_{ers}$ .....	52
Bild 7.4:	Optisch analysierte, oxidierte Kontaktfläche einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Cu-ETP R300 nach einer thermischen Beanspruchung für 5.000 h bei 160 °C und einer Kontaktkraft von 25 kN [46] .....	53
Bild 7.5:	Aufbau und Randbedingungen im numerischen Berechnungsmodell zur mechanischen Spannungsverteilung in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen (schematisch) .....	54
Bild 7.6:	Numerisch berechnete mechanische Spannungsverteilung in der Trennfuge zwischen dem Schraubenkopf und der Unterlegscheibe einer Schraubenverbindung (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14.....	56
Bild 7.7:	Numerisch berechnete mechanische Spannungsverteilung in der Trennfuge zwischen der Unterlegscheibe und der Oberfläche der Stromschiene einer Schraubenverbindung (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14.....	56
Bild 7.8:	Oberfläche einer Stromschiene aus Al 99,7 einer geöffneten Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente ((OFF) – Kapitel 6.2.1) nach einer thermischen Beanspruchung von 90 °C für eine Zeit von 8.300 h.....	57
Bild 7.9:	Mechanische Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche $A_s$ einer Schraubenverbindung ((OFF) - (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14.....	58
Bild 7.10:	Versuchsaufbau zum Messen der mechanischen Spannung mit Druckmessfolien in einer Schraubenverbindung mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14.....	58
Bild 7.11:	Rot verfärbte Druckmessfolien abhängig vom Messbereich der mechanischen Spannung (Folien: „LLW“ - a), „LW“ - b), „MS“ - c), „HS“ - d)) nach der Druckbelastung (links) und softwaregestützter optischer Auswertung (rechts) .....	60
Bild 7.12:	Druckmessfolie mit der Bezeichnung „HHS“ nach dem Experiment .....	60
Bild 7.13:	Mechanische Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 (experimentell mit Druckmessfolien bestimmt) .....	61
Bild 7.14:	Berechnen des elektrischen Kontaktverhaltens von Verbindungen mit Stromschienen, abhängig von der kontaktierten Fläche und mechanischen Spannungsverteilung (schematisch).....	63
Bild 7.15:	Idealer Gütefaktor $k_{u,ideal}$ einer Schraubenverbindung mit Stromschienen 40 mm x 10 mm x 100 mm abhängig von der Form und Größe der ideal leitfähigen Kontaktfläche bezogen auf die scheinbare Kontaktfläche $A_s$ .....	66

Bild 7.16:	Versuchsaufbau zum Messen des Verbindungswiderstands $R_V$ abhängig von der Kontaktkraft $F_K$ an Schraubenverbindungen mit Stromschienen.....	67
Bild 7.17:	Realer Gütefaktor $k_{u,real}$ für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit einer scheinbaren Kontaktfläche von $A_s = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ (mit und ohne Bohrung) für verschiedene Fügeelemente und abhängig der Kontaktkraft $F_K$ .....	68
Bild 7.18:	Mechanischer und elektrischer Kontakt zwischen den Stromschienen beim Verspannen mit Stahlelementen in der Materialprüfmaschine (schematisch) .....	70
Bild 7.19:	Flächenbezogener Leitwert $G'$ für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit einer scheinbaren Kontaktfläche von $A_s = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ und unterschiedlich kontaktierten Flächen $A_{KF}$ .....	71
Bild 7.20:	Numerisches Berechnungsmodell zum elektrischen Kontaktverhalten einer Schraubenverbindung mit Stromschienen unter Berücksichtigung der mechanischen Spannungsverteilung auf der scheinbaren Kontaktfläche $A_s$ (schematisch).....	72
Bild 7.21:	Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 mit spanabhebend bearbeiteter Oberfläche. a) Mit Stahldrahtbürste gereinigte Kontaktfläche, b) Kontaktfläche vor der abrasiven Vorbehandlung, c) Verkleinerte scheinbare Kontaktflächen $A_s$ .....	72
Bild 7.22:	Flächenbezogener Leitwert $G'$ abhängig von der mittleren mechanischen Spannung $\sigma_{Mittel}$ für Verbindungen mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und spanabhebend bearbeiteter Oberfläche zum Verkleinern der scheinbaren Kontaktfläche $A_s$ .....	73
Bild 7.23:	Härte für die technisch reinen Aluminiumwerkstoffe Al 99,5(A) H14 und Al 99,7 abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen.....	76
Bild 7.24:	Härte für die Aluminiumlegierungen Al MgSi, Al MgSi(B) und Al Mn0,5Mg0,5 abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen .....	77
Bild 7.25:	Elektrische Leitfähigkeit von Al 99,7 und Al MgSi im Anlieferungszustand und der Legierungen Al MgSi(B)-T6 und Al Mn0,5Mg0,5 abhängig von der Warmlagerungszeit bei einer Temperatur von $140^\circ\text{C}$ im Wärmeschrank.....	78
Bild 7.26:	Elektrische Leitfähigkeit von Al 99,5(A) H14 und Al MgSi(B)-T7 im Anlieferungszustand und abhängig von der Warmlagerungszeit bei verschiedenen Temperaturen im Wärmeschrank .....	79
Bild 7.27:	Kontaktkraft $F_K$ und Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen (OFF - Kapitel 6.2.1, MFF - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al 99,5(A) und Al 99,7 abhängig von der Zeit und Temperatur .....	80
Bild 7.28:	Kontaktkraft $F_K$ und Gütefaktor $k_u$ für Schraubenverbindungen (MFF) (Kapitel 6.2.2) mit Stromschienen aus Al MgSi(B) im Zustand T7 abhängig von der Zeit und der Betriebstemperatur .....	81

Bild 7.29:	Kontaktkraft $F_K$ und Gütefaktor $k_u$ für Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen (OFF - Kapitel 6.2.1, MFF - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen abhängig von der Zeit bei einer Temperatur von 140 °C.....	82
Bild 7.30:	Kontaktkraft $F_K$ von Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus verschiedenen Aluminiumwerkstoffen abhängig vom Larson-Miller-Parameter $P'$ bei verschiedenen Dauerbetriebs-temperaturen; Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf der Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß $R^2$ farbcodiert entsprechend des untersuchten Aluminiumwerkstoffs. ....	84
Bild 7.31:	Kontaktkraft $F_K$ von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 abhängig vom Larson-Miller-Parameter $P'$ bei verschiedenen Dauerbetriebstemperaturen. Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf der Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß $R^2$ farbcodiert entsprechend der Temperatur. ....	86
Bild 7.32:	Kontaktkraft $F_K$ von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen (MFF) (Kapitel 6.2.2) und Stromschienen aus Al MgSi(B)-T7 abhängig vom Larson-Miller-Parameter $P'$ bei verschiedenen Dauerbetriebstemperaturen. Extrapolierte Kontaktkraft nach 30 Jahren basierend auf den Regressionsgeraden. Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß $R^2$ farbcodiert entsprechend der Temperatur.....	87
Bild 7.33:	Zusammenhang zwischen dem Gütefaktor $k_u$ und der Kontaktkraft $F_K$ an Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen ((OFF) - Kapitel 6.2.1, (MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen der Maße 40 mm x 40 mm x 10 mm abhängig vom Werkstoff.....	88
Bild 7.34:	Zusammenhang zwischen dem Gütefaktor $k_u$ und der Kontaktkraft $F_K$ an Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Fügeelementen ((OFF) - Kapitel 6.2.1, (MFF) - Kapitel 6.2.2) und Stromschienen der Maße 50 mm x 50 mm x 10 mm abhängig vom Werkstoff.....	89
Bild 8.1:	Elektrisches Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Al MgSi-T6 mit minimalen Schichtdicken.....	96
Bild 8.2:	Elektrisches Kontaktverhalten von Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) und einer beschichteten (minimale Schichtdicken) und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6.....	97
Bild 8.3:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei beschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromführend und im Wärmeschränk* über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gealtert .....	98

Bild 8.4:	a) Abschnitte beschichteter Stromschienen, b) Abschnitt in Einbettmittel für mikroskopische Untersuchungen am Querschliff und zum Bestimmen der Härte in den metallischen Überzügen.....	100
Bild 8.5:	Je ein Prüfeindruck für die Messung der Vickers-Mikrohärte in thermisch belasteten Proben (10.000 h bei 220 °C), a) Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Cu und einer Deckschicht aus Ag, b) Al MgSi mit einer elektrolytisch abgeschiedenen Deckschicht aus Ni, c) Al MgSi mit einer autokatalytisch abgeschiedenen Deckschicht aus Ni-P (Typ 5).....	101
Bild 8.6:	Vickers-Mikrohärte der untersuchten metallischen Überzüge abhängig von der Temperatur und der Zeit.....	101
Bild 8.7:	a) Proben, b) Versuchsaufbau, c) Messeinrichtung für das Bestimmen der elektrischen Leitfähigkeit dünner Schichten nach der Vier-Leiter-Messmethode [38] .....	103
Bild 8.8:	Kontaktkraft $F_K$ und mittlerer Gütefaktor $k_u$ von stromführenden Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei identisch beschichteten Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6 nach 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C .....	104
Bild 8.9:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromlos im Wärmeschrank über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gelagert .....	106
Bild 8.10:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al 99,5(A) H14 und Al MgSi-T6, stromlos im Wärmeschrank über 25.000 h bei einer Temperatur von (115 und 140) °C gelagert .....	107
Bild 8.11:	Mit einem Wasserstrahl geschnittene Probe aus einer thermisch belasteten Schraubenverbindung mit Stromschienen und gerillten Kontaktflächen.....	108
Bild 8.12:	Mikroskopische Untersuchungen an einem für eine Zeit von $t = 10.000$ h bei einer Temperatur von 220 °C im Wärmeschrank gelagertem Abschnitt einer versilberten Stromschiene aus Al MgSi mit einer Zwischenschicht aus Kupfer.	111
Bild 8.13:	Mikroskopische Untersuchungen an einem für eine Zeit von 15.000 h bei einer Temperatur von 220 °C im Wärmeschrank gelagertem Abschnitt einer versilberten Stromschiene aus Al 99,5(A) mit einer Zwischenschicht aus Kupfer sowie die chemische Zusammensetzung einzelner untersuchter Bereiche mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) im Rasterelektronenmikroskop.....	111
Bild 8.14:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen ((MFF) – Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen aus Al 99,5(A) und einem metallischen Überzug aus Ni-P unterschiedlichen Typs bei 115 °C im Wärmeschrank gelagert.....	115
Bild 8.15:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen ((MFF) – Kapitel 6.2.2) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) und einem metallischen Überzug aus Ni-P unterschiedlichen Typs bei 140 °C im Wärmeschrank gelagert .....	116

---

Bild 8.16:	Schraubenverbindung mit Stromschienen präpariert für das kontinuierliche Messen des Verbindungswiderstands während des Lagerns im Wärmeschrank .....	117
Bild 8.17:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Al MgSi und metallischem Überzug aus elektrolytisch Ni und autokatalytisch Ni-P (Typ 5). Alterung im Dauerlast- (DL) und Wechsellastbetrieb mit (TLZ) bei 140 °C im Wärmeschrank. Vergleich mit den Langzeitversuchen in Bild 8.3.....	118
Bild 8.18:	Gütefaktor $k_u$ von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Al MgSi und metallischem Überzug aus elektrolytisch Ni und autokatalytisch Ni-P (Typ 5). Alterung im Dauerlastbetrieb (DL) bei 140 °C im Wärmeschrank und anschließender Temperaturlastzyklen (TLZ) .....	118

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Aluminiumwerkstoffe für die Anwendung in der Elektrotechnik [N2], [N4] .....	2
Tabelle 2.2:	Physikalische, elektrische und mechanische Eigenschaften von stranggepressten Stangen aus Al 99,5(A) und Al MgSi(B) [N2], [N8], [1], [4] .....	3
Tabelle 2.3:	Einteilung der Baufehler eines realen Kristalls nach dessen Geometrie [1], [6], [7], nach [9] .....	4
Tabelle 2.4:	Hindernisse für Versetzungen in Aluminiumwerkstoffen [1], [6], [10], [11] .....	5
Tabelle 2.5:	Phasen des Ausscheidungshärtens am Beispiel von Al MgSi(B) .....	7
Tabelle 2.6:	Angaben zu zugelassenen Grenztemperaturen für stromführende Leiter und Verbindungen in der Elektroenergietechnik nach internationalen Standards .....	8
Tabelle 2.7:	Physikalische Eigenschaften und Mikrostruktur metallischer Überzüge .....	9
Tabelle 2.8:	Elektrische und mechanische Eigenschaften der metallischer Überzüge .....	10
Tabelle 4.1:	Bekannte Alterungsmechanismen stromführender Verbindungen [2], [3], [38] .....	19
Tabelle 4.2:	Fremdschichten auf Werkstoffen elektrischer Leiter und metallischer Überzüge im Temperaturbereich bis 200 °C [3], [8], [34], [43], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53] .....	20
Tabelle 4.3:	Physikalische Mechanismen der Werkstoffentfestigung [6], [11], [56] .....	26
Tabelle 4.4:	Viskoplastische Verformung der Werkstoffe bei mechanischer Belastung [56] .....	28
Tabelle 4.5:	Elektrische Leitfähigkeit und Mikrohärtigkeit von intermetallischen Phasen (IMP) in binären Phasendiagrammen [65] zu den Werkstoffpaarungen Al - Ni, Al - Cu und Al - Ag .....	35
Tabelle 6.1:	Hauptlegierungselemente in den Aluminiumwerkstoffen (Massenanteil $w_i$ in %) (Bezeichnung der Werkstoffe nach DIN EN 573-3:2013-12, [N4]) .....	41
Tabelle 6.2:	Mechanische Eigenschaften der experimentell untersuchten Werkstoffe im Anlieferungszustand .....	41
Tabelle 6.3:	Untersuchte Geometrie der Stromschienen und Fügeelemente .....	43
Tabelle 6.4:	Werkstoffabhängige Vorbehandlung der Kontaktflächen vor der Montage [54] .....	45
Tabelle 7.1:	Werkstoffparameter und Reibungskoeffizienten im FEM-Modell .....	55
Tabelle 7.2:	Firmenbezeichnung und Messbereiche der Druckmessfolienarten .....	59
Tabelle 7.3:	Randbedingungen bei der Messung mit Druckmessfolien .....	59
Tabelle 7.4:	Flächeninhalt und mechanische Spannung auf den experimentell bestimmten und berechneten mechanisch belasteten Flächen in einer Schrauben-Verbindung ohne federnde Fügeelemente ((OFF) - Kapitel 6.2.1) .....	62
Tabelle 7.5:	Kontaktfläche abhängig von der mechanischen Spannung .....	62

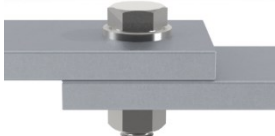

Tabelle 7.6:	Ergebnisse der Berechnung mit unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen zwei Stromschienen und die experimentelle Versuchsanordnung zum Verifizieren der Modelle .....	65
Tabelle 7.7:	Vergleich der berechneten und experimentell bestimmten Ergebnisse zu Verbindungen mit unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen zwei Stromschienen (mit und ohne Bohrung) aus Al 99,5(A) .....	69
Tabelle 7.8:	Vergleich der berechneten und experimentell bestimmten Gütefaktoren einer Schraubenverbindung ohne federnde Fügeelemente (OFF) (Kapitel 6.2.1) mit Stromschienen aus Al 99,5(A) H14 für eine Kontaktkraft von $F_K = 25$ kN.....	74
Tabelle 7.9:	Experimentelle Untersuchungen zum Kraftabbau an Schraubenverbindungen abhängig von den Fügeelementen und des Stromschienenwerkstoffs.....	75
Tabelle 8.1:	Untersuchte Kombinationen: Leiterwerkstoff, metallischer Überzug und Schichtdicke für Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei identisch beschichteten Stromschienen .....	93
Tabelle 8.2:	Untersuchte Kombinationen: Leiterwerkstoff, metallischer Überzug und Schichtdicke für Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Aluminium .....	94
Tabelle 8.3:	Elektrische Leitfähigkeit $\kappa_{20}$ und spezifischer elektrischer Widerstand $\rho_{20}$ des metallischen Überzugwerkstoffs Ni-P (Typ 5) abhängig von der Mikrostruktur im abgeschiedenen Zustand und nach der Wärmebehandlung .....	103
Tabelle 8.4:	Kontaktpunkt in einer Schraubenverbindung mit einer vernickelten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6 und gerillter Kontaktfläche.....	109
Tabelle 8.5:	Kontaktpunkt in einer Schraubenverbindung mit einer versilberten und einer unbeschichteten Stromschiene aus Al MgSi-T6 und gerillter Kontaktfläche.....	110
Tabelle 8.6:	Schwarze Anlaufschichten auf metallischen Überzügen aus Silber mit einer Zwischenschicht aus Kupfer .....	112
Tabelle 8.7:	Schraubenverbindungen ((MFF) - Kapitel 6.2.2) mit zwei vernickelten Stromschienen und metallischen Überzügen aus Ni-P mit unterschiedlichen Massenanteilen an Phosphor (Tabelle 2.7) .....	115

## Anhang

Tabelle A. 1: Mechanische Eigenschaften<sup>37</sup> der untersuchten Aluminiumwerkstoffe nach einer thermischen Belastung

Materialbezeichnung [N4] Chemisch EN AW-			Al MgSi(B)	Al MgSi(B)	Al Mn0,5Mg0,5
Materialzustand [N9]			T6	T7	strang- gepresst
Zugfestigkeit $R_m$ / Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup> (abhängig von der Temperatur)	Lagerung bei etwa 20 °C	20 °C	237 / 212	202 / 153	179 / 80
		140 °C	192 / 177	165 / 131	169 / 84
	7.300 h bei 140 °C	20 °C	192 / 163	- / -	- / -
		140 °C	154 / 141	- / -	- / -
	15.500 h bei 140 °C	20 °C	- / -	- / -	205 / 149
		140 °C	- / -	- / -	174 / 136
	20.000 h bei 140 °C	20 °C	- / -	165 / 122	- / -
		140 °C	- / -	127 / 102	- / -

Tabelle A. 2: Gemessene Vorspannkraft an Schraubenverbindungen mit verschiedenen Fügeelementen

Versuch	Schraubenverbindungen ohne federnde Fügeelemente ((OFF) – Kapitel 6.2.1)		Schraubenverbindungen mit federnden Fügeelementen ((MFF) – Kapitel 6.2.2)	
	Anziehdrehmoment $M_A$	Gemessene Vorspannkraft in kN	Anziehdrehmoment $M_A$	Gemessene Vorspannkraft in kN
Nr. 1	 80 Nm	25,14	 130 Nm	24,52
Nr. 2		23,95		25,48
Nr. 3		26,54		25,84
Nr. 4		26,96		26,23
Nr. 5		22,99		24,32
Nr. 6		22,85		27,88
Nr. 7		23,13		26,74
Nr. 8		24,13		27,65
Nr. 9		25,16		22,55
Nr. 10		24,2		22,58
Nr. 11		24,49		24,02
Nr. 12		26,26		24,09
Nr. 13		22,49		26,44
Nr. 14		27,65		27,00
Nr. 15		24,53		29,46
Mittelwert und Spannweite		$24,7^{+3}_{-2,2}$		$25,7^{+3,8}_{-3,1}$

<sup>37</sup> Einachsige Zugversuche: (Form B) nach [N19], Firma Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, überwiegend im Rahmen des geförderten Projekts (BMBF): „ALLEE“, Förderkennzeichen: 03EK3538



Tabelle A. 3: Optische Analyse schwach oxidierten Flächen  $A_{Oxi}$  (Kapitel 7.1.1, Bild 7.4) auf der scheinbaren Kontaktfläche von Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Cu-ETP R300 nach einer thermischen Belastung für eine Zeit von 5.000 h bei 160 °C in [8]

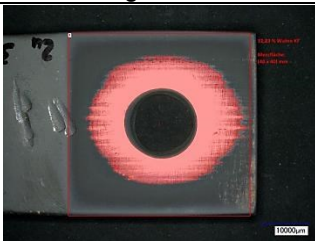
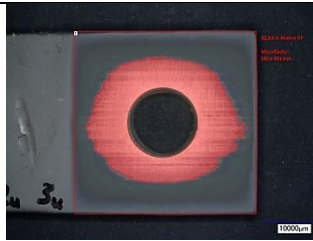
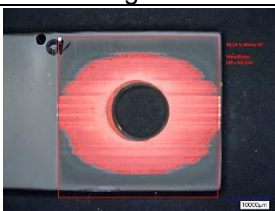

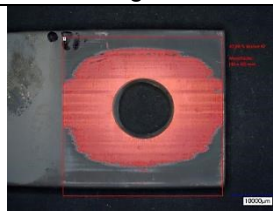
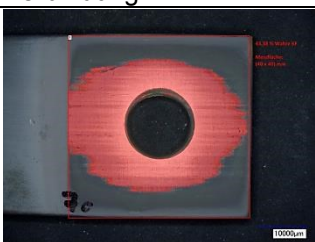
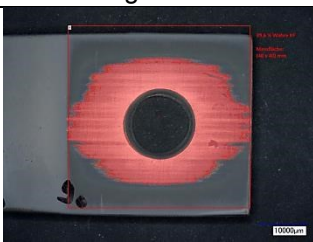

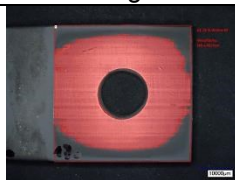
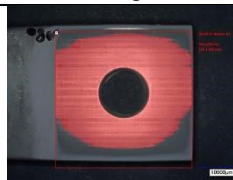
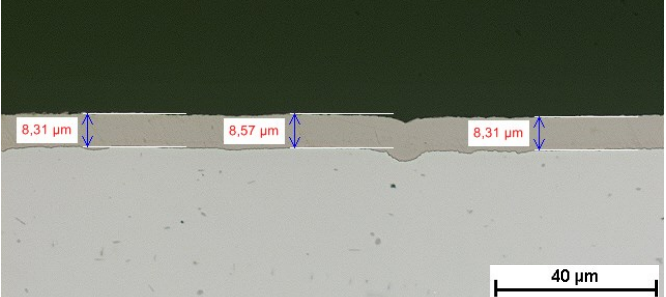
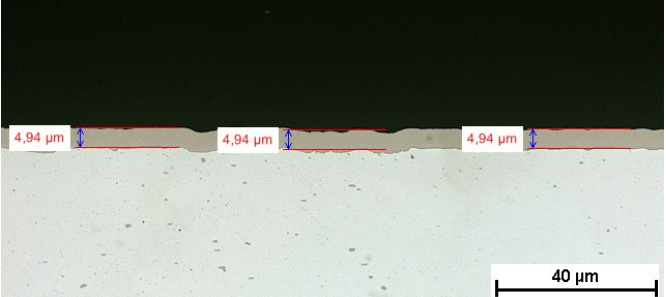
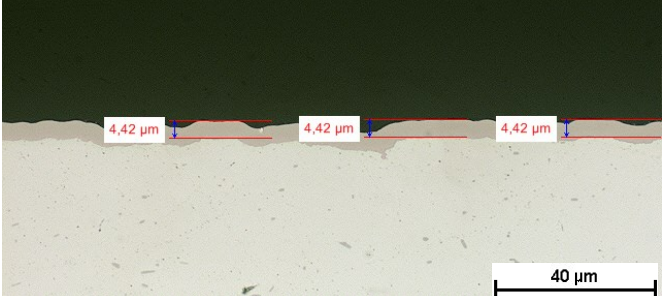
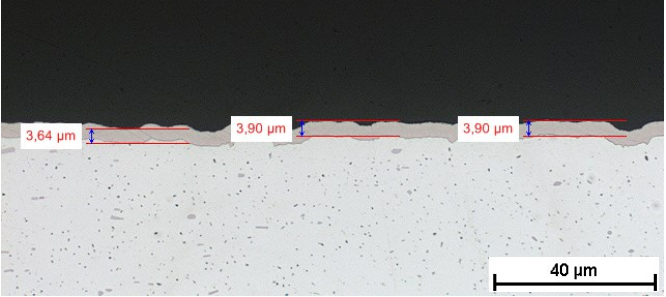
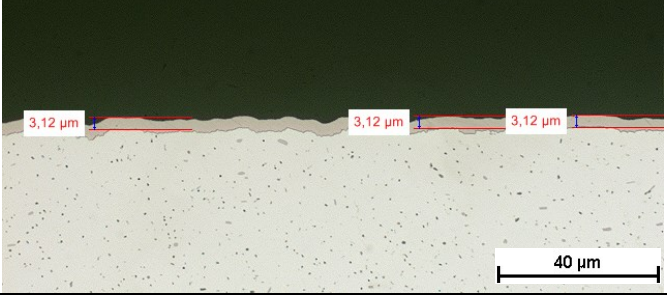
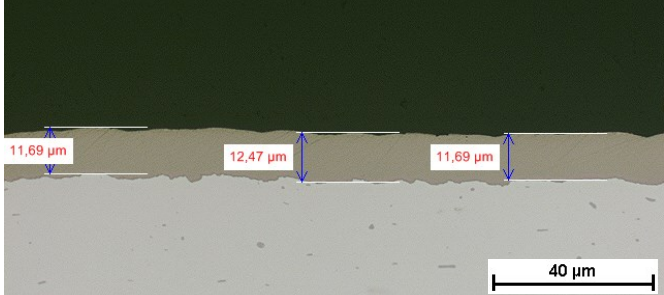
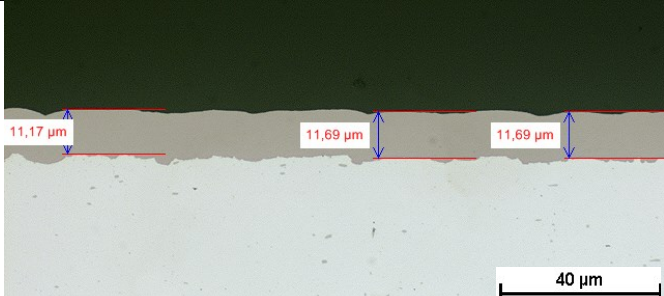
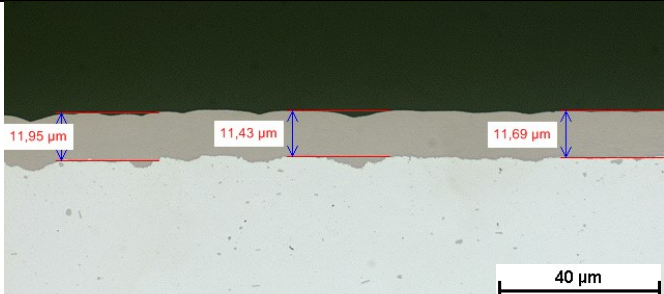
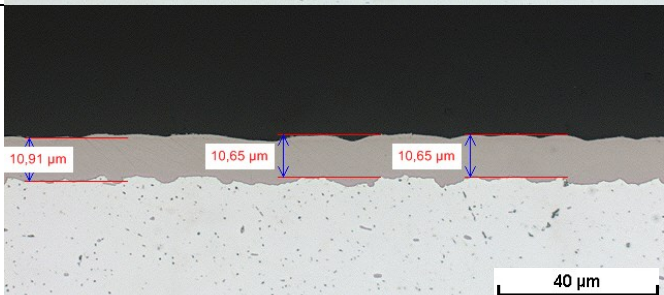
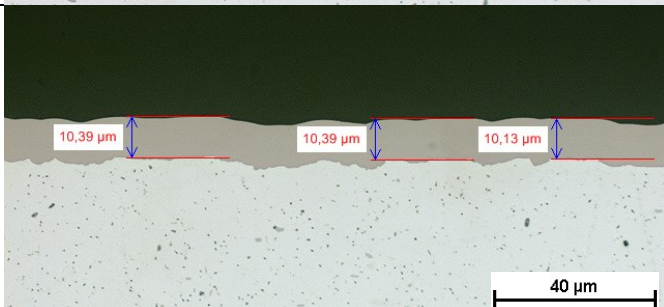
Zusätzliche Fügeelemente: Flache Scheiben der normalen Reihe [N24]		
Verbindung Nr. 2		Verbindung Nr. 3
		
Anteil der nur schwach oxidierten Fläche $A_{Oxi}$		
32,8 %		32,8 %
Gesamtfläche: (40 x 40) mm = 1600 mm <sup>2</sup>		
Zusätzliche Fügeelemente: Druckplatten (30 x 30 x 10) mm und flache Scheiben der normalen Reihe [N24]		
Verbindung Nr. 10	Verbindung Nr. 11	Verbindung Nr. 12
		
Anteil der nur schwach oxidierten Fläche $A_{Oxi}$		
48,1 %	46,0 %	47,9 %
Gesamtfläche: (40 x 40) mm = 1600 mm <sup>2</sup>		
Zusätzliche Fügeelemente: Flache Scheiben der großen Reihe [N25]		
Verbindung Nr. 7		Verbindung Nr. 9
		
Anteil der nur schwach oxidierten Fläche $A_{Oxi}$		
43,4 %		39,6 %
Gesamtfläche: (40 x 40) mm = 1600 mm <sup>2</sup>		
Zusätzliche Fügeelemente: Spannscheiben [N26]		
Verbindung Nr. 16	Verbindung Nr. 17	Verbindung Nr. 18
		
Anteil der nur schwach oxidierten Fläche $A_{Oxi}$		
64,3 %	62,2 %	61,0 %
Gesamtfläche: (40 x 40) mm = 1600 mm <sup>2</sup>		

Tabelle A. 4: Mikroskopische Untersuchungen an beschichteten Proben aus Al MgSi

Eigenschaften der Probe und Angaben zur thermischen Belastung	Metallografischer Querschliff	Bemerkungen
Deckschicht: Ag Zwischenschicht: Cu Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: Anlieferungszustand		Metallischer Überzug aus Cu / Ag ist konturentreu und hat keine Einschlüsse
Deckschicht: Ag Zwischenschicht: Cu Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 115 °C		IMP zwischen Al MgSi und Zwischenschicht aus Cu mit einer Schichtdicke von ca. 0,6 µm
Deckschicht: Ag Zwischenschicht: Cu Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 140 °C		IMP zwischen Al MgSi und Zwischenschicht aus Cu mit einer Schichtdicke von ca. 1,0 µm
Deckschicht: Ag Zwischenschicht: Cu Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 4.400 h bei 220 °C		Mehrere IMP zwischen Al MgSi und Zwischenschicht aus Cu mit einer gesamten Schichtdicke von ca. 4,2 µm
Deckschicht: Ag Zwischenschicht: Cu Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 220 °C		Mehrere IMP zwischen Al MgSi und Zwischenschicht aus Cu mit einer gesamten Schichtdicke von ca. 5,5 µm

Eigenschaften der Probe und Angaben zur thermischen Belastung	Metallografischer Querschliff	Bemerkungen
Deckschicht: Ni Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: Anlieferungszustand		Metallischer Überzug aus elektrolytisch abgeschiedenem Ni ist konturentreu und hat keine Einschlüsse
Deckschicht: Ni Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 115 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni nachweisbar
Deckschicht: Ni Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 140 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni nachweisbar
Deckschicht: Ni Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 4.400 h bei 220 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni nachweisbar
Deckschicht: Ni Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 220 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al - Ni nachweisbar



Eigenschaften der Probe und Angaben zur thermischen Belastung	Metallografischer Querschliff	Bemerkungen
Deckschicht: Ni-P (Typ 5) Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: Anlieferungszustand		Metallischer Überzug aus autokatalytisch abgeschiedenem Ni-P (Typ 5) ist konturentreu und hat keine Einschlüsse
Deckschicht: Ni-P (Typ 5) Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 115 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al – Ni-P (Typ 5) nachweisbar
Deckschicht: Ni-P (Typ 5) Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 140 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al – Ni-P (Typ 5) nachweisbar
Deckschicht: Ni-P (Typ 5) Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 4.400 h bei 220 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al – Ni-P (Typ 5) nachweisbar
Deckschicht: Ni-P (Typ 5) Stromschiene: Al MgSi  Thermische Belastung: 10.000 h bei 220 °C		Keine intermetallischen Phasen im System Al – Ni-P (Typ 5) nachweisbar